تبخیر

کلّیات	تبخیر از سطوح مرطوب خاک و گیاه
فرایند تبخیر	تبخیر-تعرق واقعی
تبخیر از سطح آزاد آب	تبخیر-تعرق پتانسیل
روش بیلان آب	تبخیر-تعرق گیاه مرجع
روش تشت تبخیر	ضریب گیاهی
معادله‌های تجربی	مسائل
تبخیر از سطح برف	منابع برای مطالعه بیشتر

۶-۱ کلّیات

فرایند تبدیل آب به بخار را تبخیر گویند. تبخیر ممکن است از سطوح آزاد آب، از سطح مرطوب خاک و یا به صورت تعرق از سطح گیاهان صورت گیرد. بین پدیده‌های مختلف چرخه هیدرولوژی، اندازه‌گیری تبخیر مشکلترین آنهاست. در مهندسی هیدرولوژی، تبخیر از دو نظر حائز اهمیت است؛ اولاً از آنجائی که تبخیر از سطح رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و مخازن سدها باعث تلفات آب می‌شود لازم است مقدار آن محاسبه شود. ثانیاً تبخیر - تعرق از سطح خاک و پوشش گیاهی در داخل حوضه‌های آبریز یکی از اجزاء چرخه آب به‌شمار می‌رود. برآورد میزان آبی که در طرحهای آبیاری به مصرف کشاورزی می‌رسد نیز براساس تبخیر - تعرق انجام می‌شود. ابعاد شبکه‌های آبیاری تابع مستقیمی از مقدار و زمان آب مصرفی است که به صورت تبخیر - تعرق وارد جوّ می‌شود.

اهمیت تبخیر - تعرق در چرخه هیدرولوژی از آنجا مشخص می‌شود که یادآوری کنیم در مقیاس جهانی حدود ۵۷ درصد آبی که روی خشکیها بصورت نزولات جوّی فرو می‌ریزد مستقیماً تبخیر می‌شود. مقدار تبخیر از روی دریاها ۱۱۰ درصد مقدار نزولات جوی روی آنهاست. یعنی بیش از مقدار آبی که روی دریاها بصورت بارندگی ریزش می‌کند از سطح دریاها آب تبخیر می‌شود. در آب و هوای خشک و نیمه‌خشک قسمت اعظم بارندگی‌های

سالانه‌بلافاصله پس از بارش توسط تبخیر یا تعرق مجدداً وارد اتمسفر می‌شود. مثلاً در پهنهٔ ایران که مقدار بارندگی سالانه در مجموع حدود ۴۱۳ میلیاردمترمکعب بر آورد شده است ۲۹۶ میلیارد متر مکعب یا ۷۲ درصد آن بلافاصله توسط تبخیر - تعرق تلف شده و وارد اتمسفر می‌شود. تبخیر از سطح آب دریاچه‌ها بخصوص در مخازن سدّها که با صرف هزینه‌های زیاد احداث می‌شوند حائز اهمیت است. بعنوان مثال مقدار تبخیر سالانه از سطح دریاچه ناصر در پشت سد آسوان (Aswan) در مصر بالغ بر ۱۵ درصد مقدار کلّ جریان ورودی رودخانهٔ نیل به مخزن این سدّ برآورد شده است که با توجه به حجم بسیار عظیم آب ذخیره شده در این سدّ نشان دهنده مقدار زیاد تلفات آب در اثر تبخیر می‌باشد. به استثنای تبخیر از سطوح آزاد آب (مانند دریاچه‌ها، رودخانه‌ها و مخازن آب) تبخیر در سطح زمین همواره با تعرق همراه بوده و مقدار تبخیر از سطوح مرطوب خاک و گیاه را نمی‌توان از یکدیگر تفکیک کرد بهمین دلیل به مجموع مقدار تبخیر (evaporation) از سطح خاک و مقدار آبی که از طریق ریشه‌های گیاه جذب و از سطوح شاخ و برگ آن تعرق (transpiration) می‌پذیرد، **تبخیر-تعرق** (evapotranspiration) گفته می‌شود. عوامل مؤثر بر تبخیر زیاد است که از جمله می‌توان به تابش خورشید، سرعت باد، شوری آب و سطح تبخیر اشاره کرد.

تابش خورشید تبخیر، همانطور که گفته شد، عمل تبدیل آب مایع به بخار است. این عمل فقط در صورت وجود انرژی امکان‌پذیر است. برای تبدیل هر گرم آب به‌بخار حدود ۶۰۰ کالری حرارت لازم است. بنابراین تبخیر می‌تواند در طول روز و حتی درشب، چنانچه انرژی در اختیار باشد، صورت گیرد. اصولاً مقدار انرژی که بتواند عمل تبخیر را انجام دهد در روز بیشتر از شب و در تابستان بیشتر از زمستان است. عرض جغرافیایی محل نیز که انرژی دریافت شده از خورشید به آن بستگی دارد در این امر دخالت دارد. به عبارت دیگر تبخیر بستگی به موقعیت جغرافیایی منطقه داشته و دارای تغییرات روزانه، ماهانه و فصلی است. همانطور که در فصل دوم توضیح داده شد، مسلماً مقدار تبخیر در عرضهای جنوبی که تابش دریافتی در آنها زیادتر است بمراتب بیشتر از شدت تبخیر در نواحی شمالی می‌باشد. اگر دمای محیط را نمایه انرژی دریافتی از خورشید در نظر بگیریم، در سطح آزاد آب مقدار و سرعت تبخیر متناسب با دمای آب می‌باشد. با افزایش دمای آب، سرعت حرکت مولکول‌های مایع زیاد می‌شود و عملاً مولکول‌های بیشتری سرعت لازم برای شکستن پیوندها و فایق آمدن بر نیروی کشش سطحی و فرار از سطح مایع را به دست می‌آورند. بهمین دلیل آب داغ سریعتر از آب سرد تبخیر می‌شود. مثلاً اگر یک گرم آب خنک صفر درجه برای تبخیر شدن ۶۰۰ کالری انرژی لازم داشته باشد یک گرم آب داغ ۱۰۰ درجه فقط ۵۵۰ کالری نیاز خواهد داشت.

رطوبت نسبی هرچه هوای مجاور سطح آب، ذرّات بیشتری از مایع را در خود جای داده باشد

تعداد زیادتری از همان ذرّات قادرند از هوا به داخل مایع بازگردند و از این‌رو میزان خالص تبخیر کم می‌شود. به همین دلیل در هوای خشک، تبخیر بیشتر از هوای مرطوب صورت می‌گیرد. لذا یکی از عوامل مؤثر بر تبخیر مقدار رطوبت نسبی هواست. اگر هوایی که توسط باد از مرز سطح مرطوب و هوا به خارج رانده می‌شود با هوایی که به همان نسبت از بخار اشباع است جایگزین شود باد نقشی نخواهد داشت، زیرا در این صورت هوا قدرت جذب بخار آب جدید را ندارد. این موضوع را شما بخوبی در مؤثر نبودن کولرهای آبی درهنگامی که هوا رطوبت زیاد دارد تجربه کرده‌اید. لذا تبخیر زمانی می‌تواند با سرعت ادامه یابد که هوای اشباع لایهٔ مجاور توسط باد با هوای خشکتر جایگزین شود.

سرعت باد بلافاصله پس از تبخیر، لایهٔ نازک هوایی که در حد فاصل سطح مرطوب و جوّ قرار گرفته است از بخار آب اشباع می‌شود. اگر این لایه در جای خود ساکن باقی بماند عمل تبخیر متوقف می‌شود. زیرا در یک هوای اشباع مقدار خالص تبخیر برابر صفر است. بنابراین برای تداوم تبخیر لازم است لایهٔ اشباع شده به خارج رانده شود. این عمل در طبیعت توسط باد انجام می‌شود. بنابراین سرعت و تداوم باد در این مورد از اهمیت زیادی برخوردار است و تخمین آن در طرحهای هیدرولوژی نیز به همان ترتیب حایزاهمیت است. تا یک حد معین، افزایش سرعت باد در جابجایی و دورکردن بخار آب از سطح تبخیر مؤثر بوده و مقدار رطوبت در بالای آب را در حد پایین نگه می‌دارد. مثلاً وقتی بدن خود را در هوای گرم باد می‌زنیم، در واقع رطوبتی راکه به شکل بخار در آمده از روی پوست بدن دور می‌کنیم. بدین طریق سرعت تبخیر را افزایش می‌دهیم که این عمل باعث افزایش مصرف گرما به منظور تأمین گرمای نهان تبخیر از بدن می‌گردد و در نتیجهٔ آن، احساس خنک شدن به انسان دست می‌دهد.

شوری آب تبخیر آب با شوری آن رابطه عکس دارد، یعنی که هرچه شوری آب بیشتر باشد، میزان تبخیر کمتر خواهد بود. در شرایط مساوی، سرعت تبخیر در آب اقیانوسها (آب شور) ۵ درصد کمتر از آب خالص می‌باشد. دلیل این امر افزایش پتانسیل اسمزی آب در اثر وجود نمک می‌باشد. در شرایطی که پتانسیل اسمزی آب بالا باشد خارج شدن مولکول‌های آب از سطح مایع به سختی صورت می‌گیرد.

سطح تبخیر اگر دو مقدار آب با حجم مساوی موجود باشد، آبی که با سطح بیشتر در مقابل هوا قرار می‌گیرد با سرعت بیشتری تبخیر خواهد شد. در مورد تبخیر - تعرق علاوه بر عوامل فوق خود گیاه نیز به لحاظ نوع گیاه، شکل برگها، تعداد روزنه‌های موجود در سطح برگها و خصوصیات فیزیولوژی گیاه نقش دارد. برخی از گیاهان مصرف کننده شدید آب هستند حال آنکه بعضی از آنها در مقابل کم آبی مقاوم بوده و مصرف آب توسط آنها کم است. تمام گیاهان

برای رشد و ادامهٔ حیات خود به آب نیاز دارند. درصد کمی از این آب در داخل بافتهای گیاهی نگهداری و قسمت اعظم آبی که توسط ریشه‌ها جذب می‌شود، دوباره به صورت تعرق از طریق روزنه‌های موجود در سطح برگها به‌اتمسفر برمی‌گردد. همانطور که اشاره شد در حوضه‌های آبریز که در آنها هم سطوح مرطوب خاک وجود دارد و هم پوشش گیاهی، تفکیک تعرق از تبخیر امکان‌پذیر نمی‌باشد و بهمین دلیل این دو فرایند که بطور توأم صورت می‌پذیرند تبخیر-تعرق نامیده می‌شود. در شبکه‌های آبیاری نیز آبی که برای آبیاری زراعتها به کار گرفته می‌شود در واقع صرف تبخیر - تعرق گیاهان می‌شود که در مجموع به آن نیاز آبی گیاه گفته می‌شود.

مقدار آبی که یک زمین در اثر تبخیر-تعرق از دست می‌دهد به عوامل اقلیمی، نوع گیاهان و درصد پوشش گیاهی بستگی دارد. مثلاً درختان بزرگ پهن برگ که ریشه‌های عمیق دارند بیشتر از بوته‌های کوچک با ریشه‌های افشان آب تعرق می‌نمایند. تفاوت تبخیر و تعرق در این است که تبخیر بستگی به وجود و مقدار انرژی داشته و می‌تواند هم در طول روز و هم در شب ادامه داشته باشد. ولی تعرق به دلیل بسته شدن روزنه‌ها معمولاً در شب انجام نمی‌شود. عامل دیگری که بر مقدار تبخیر- تعرق مؤثر است در دسترس بودن آب است. این پدیده‌ها هر دو در صورت کم شدن آب بشدت کاهش می‌یابند. تبخیر از سطح آزاد آب تا زمانی که آب وجود داشته باشد به همان سرعت ادامه می‌یابد ولی میزان تبخیر- تعرق بستگی به درصد رطوبت خاک و عکس‌العمل گیاه نسبت به تنش آبی دارد. در صورتی که آب به اندازهٔ کافی در اختیار باشد تبخیر - تعرق با حداکثر توان خود صورت می‌گیرد که مقدار آن را تبخیر- ***تعرق پتانسیل*** (potential evapotranspiration) گویند. ولی در طبیعت عملاً آب همیشه به اندازهٔ توان تبخیر- تعرق در خاک یا سطح گیاه وجود نداشته و لذا مقدار تبخیر- ***تعرق واقعی*** (actual evapotranspiration) همواره کمتر از تبخیر- تعرق پتانسیل است. اندازه‌گیری یا تخمین تبخیر- تعرق واقعی بمراتب مشکلتر از تبخیر- تعرق پتانسیل است. در این فصل سعی شده است فرایند تبخیر و روشهایی که می توان به وسیله آنها مقدار تبخیر از سطح آزاد آب یا تبخیر - تعرق را تخمین زد تا حدی که در هیدرولوژی جنبه کاربردی داشته باشند تشریح گردند.

۲-۶ فرایند تبخیر

می‌دانیم که یک مولکول آب از دو اتم هیدرژن و یک اتم اکسیژن تشکیل شده است که بصورت کووالانتی بهم پیوند شده‌اند. مولکول آب قطبی یا پلاریزه است. یعنی یک طرف آن که اتم‌های هیدرژن قرار دارند دارای بار الکتریکی مثبت و طرف دیگر آن که اتم اکسیژن قرار دارد دارای بار الکتریکی منفی است. به همین دلیل قسمت مثبت یک مولکول آب توسط قسمت منفی مولکول دیگر جذب می‌شود و به اصطلاح مولکول‌های آب به یکدیگر می‌چسبند. این

نوع چسبندگی را پیوند هیدرژنی می‌گویند. حال اگر قرار باشد که آب تبخیر شود لازم است پیوندهای هیدروژنی بین مولکول‌های آب شکسته شوند. برای این منظور می‌بایست انرژی جنبشی مولکول‌ها بقدری زیاد شود که بر پیوندهای هیدروژنی فائق آیند. مهمترین منبع انرژی برای آنکه انرژی جنبشی مولکول‌های آب افزایش یابد تابش خورشید است.

قبلاً گفته شد که انرژی خورشیدی بصورت تابش‌های الکترومغناطیس است که بر اساس طول موجشان دسته‌بندی می‌شوند. تابش هایی که طول موج آنها کمتر از ۰/۴ میکرون می‌باشد فرابنفش و تابشهایی که طول موجشان بین ۱ تا ۱۰۰ میکرون باشد فروسرخ نام دارند. بین این دو طیف تابش‌های قابل رویت (طول موج بین ۰/۴ تا ۰/۷۶ میکرون) قرار دارند. مقدار انرژی خورشیدی که وارد زمین می‌شود تابش ورودی (insolation) نام دارد که با R_s نشان داده می‌شود. تابش ورودی مجموعه‌ای است از طول موج‌های فرابنفش (۹درصد)، قابل رویت (۴۱ درصد) و فرو سرخ (۵۰ درصد). قسمت اعظم تابش‌های فرابنفش قبل از رسیدن به سطح زمین توسط لایه اُزن موجود در اتمسفر جذب شده و هرگز به زمین نمی‌رسند. بیشتر تابش‌های ورودی که جذب سطح زمین می‌شوند تبدیل به تابش‌های با طول موج بلند که طول موجشان بین ۳ تا ۸ میکرون می‌باشد شده و بتدریج از اتمسفر خارج می شوند.

انرژی که در سطح زمین صرف تبخیر می‌شود بخشی از تابش خالص خورشید (R_n) می‌باشد که تفاضل بین تابش‌های ورودی و خروجی از سطح زمین است.

$$R_n = R_s - R_{rs} - R_{lw} \qquad (۱-۶)$$

در این معادله R_s تابش ورودی، R_{rs} تابش منعکس شده توسط سطح زمین و R_{lw} مقدار تابش خالص خروجی از زمین با طول موج بلند است. اگر ضریب بازتاب تابش (albedo) از سطح زمین α باشد مقدار R_{rs} برابر خواهد بود با :

$$R_{rs} = R_s\,(\alpha) \qquad (۲-۶)$$

بنابراین:

$$R_n = R_s - R_s(\alpha) - R_{lw} \qquad (۳-۶)$$

$$R_n = R_s\,(1 - \alpha) - R_{lw} \qquad (۴-۶)$$

مقدار ضریب بازتاب برای مناطق نیمه کویری ۰/۲۵، کویرهای شنی ۰/۳۷، پوشش‌های گیاهان زراعی ۰/۲۳ و برای سطح آب حدود ۰/۰۷ در نظر گرفته می‌شود. اندازه گیری R_s و R_{lw} بسیار مشکل بوده و اکثر ایستگاههای هواشناسی این پارامترها را اندازه‌گیری نمی‌کنند. بهمین دلیل برای تخمین آنها باید به روش‌های تجربی و غیرمستقیم توسل جست.

تابش خالص خورشیدی (R_n) در سطح زمین به سه بخش تقسیم می‌شود. بخشی از آن بصورت گرما وارد زمین یا توده آب می‌شود (G)، بخشی دیگر موجب گرم کردن هوای مجاور می‌گردد که به آن **گرمای محسوس** می‌گوئیم (H) و بخشی دیگر باعث تغییر حالت آب مایع به

بخار می‌شود (E). در واقع در هنگام تبدیل آب مایع به بخار مقدار انرژی بصورت نهفته در هر گرم آب تبخیر شده وجود خواهد داشت که اگر دوباره این بخار آب به مایع تبدیل شود این مقدار انرژی به محیط پس داده خواهد شد. به این بخش از انرژی *گرمای نهان* گفته می‌شود. بنابراین معادله توان انرژی خورشید در سطح زمین بصورت $R_n = G + H + E$ توصیف می‌شود که اکثر معادلات محاسبه تبخیر بر اساس حل معادله فوق می‌باشد. اگر از مقدار G صرف‌نظر کنیم، پس‌از آنکه R_n از معادله ۶-۴ محاسبه گردید مقدار تبخیر از سطح آزاد آب عبارت خواهد بود از :

$$E = \frac{R_n}{\rho_w (L_v)} \qquad (۶-۵)$$

که در آن:

E = مقدار تبخیر (بر حسب سانتی متر در روز).

R_n = تابش ورودی خالص (بر حسب کالری بر سانتی متر مربع در روز).

ρ_w = دانسیته آب (گرم بر سانتی متر مکعب).

L_v = گرمای نهان تبخیر (کالری بر گرم) است که مقدار آن از معادله زیر بدست می‌آید:

$$L_v = 597.3 - 0.56\ t \qquad (۶-۶)$$

در فرمول فوق t دمای آب (درجه سانتی گراد) می‌باشد.

در هر حال برای بدست آوردن مقدار تبخیر لازم است که ابتدا R_n محاسبه شود و برای محاسبه R_n نیز لازم خواهد بود R_s و R_{lw} از فرمول‌های تجربی تخمین زده شوند. مقدار R_s بستگی به تابش خورشیدی در بالای اتمسفر (R_a) و میزان تخلیه اتمسفر یا درجه ابری بودن هوا (C) دارد و از فرمول زیربدست می‌آید:

$$R_s = R_a (0.803 - 0.340\ C - 0.458\ C^2) \qquad (۶-۷)$$

در این فرمول R_a تابش خورشیدی در ماه مورد نظر (جدول ۶-۱) در قسمت بالای اتمسفر و قبل از ورود به داخل جوّ می‌باشد. C متوسط ماهانه درجه ابری بودن هوا (بر حسب اعشار) و R_s متوسط روزانه تابش ورودی به سطح زمین برای ماه مورد نظر است. معمولاً ایستگاههای هواشناسی مقدار روزانه C را اندازه‌گیری می‌کنند که از روی آن می‌توان متوسط درجه ابری بودن آسمان را بدست آورد.

فرمول دیگری نیز برای محاسبه تابش ورودی توسط آنگستروم (Angstrom) پیشنهاد گردیده است که بر اساس ساعات آفتابی بوده و عبارت است از :

$$R_s = R_a\left(a + b\frac{n}{N}\right) \qquad (۶-۸)$$

در این فرمول a و b ضرایب محلی می‌باشند. هر چند در مناطق مختلف برای این ضرایب اعداد متفاوتی بکار برده می‌شود ولی حدوداً مقادیر آنها به ترتیب ۰/۲۳ و ۰/۴۸ می‌باشد. بنابراین :

$$R_s = R_a\left(0.23 + 0.48\frac{n}{N}\right) \qquad (۶-۹)$$

در این معادله‌ها n تعداد واقعی ساعات آفتابی مشاهده شده در طول ماه و N حداکثر ساعات

جدول ۶-۱ مقادیر ماهانه تابش خورشیدی (R_a) در قسمت بالای جوّ (کالری بر سانتی‌مترمربع در روز) برای تبدیل کالری بر سانتی‌متر مربع در روز به معادل میلی‌متر آب قابل تبخیر در روز باید ارقام جدول را بر ۵۸/۵ تقسیم کرد.

عرض جغرافیایی	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
90°N	-	-	-	465	880	1070	930	660	155	-	-	-
80	-	-	105	460	860	1050	970	625	235	10	-	-
70	-	65	255	540	800	1000	870	670	400	140	5	-
60	75	205	400	655	860	975	925	750	500	275	110	55
50	200	350	540	750	910	985	950	820	620	430	155	175
40	355	490	650	820	880	985	960	870	740	550	395	325
30	500	620	750	870	945	975	955	900	795	670	540	465
20	640	725	820	895	930	930	930	900	850	760	660	610
10	755	820	870	895	885	870	870	885	880	830	770	730
0	855	885	895	870	820	790	795	840	880	885	860	840
10	930	930	885	810	730	685	705	770	845	900	920	930
20	985	940	855	740	630	570	595	680	790	900	965	990
30	1015	930	800	640	505	445	465	575	725	870	985	1030
40	1020	895	715	525	375	305	335	450	630	810	960	1045
50°S	1000	835	620	400	240	175	200	315	505	735	950	1040

آفتابی ممکن یا قابل مشاهده در ماه مورد نظر می‌باشد که مقدار آن بستگی به عرض جغرافیایی و ماه مورد نظر دارد (جدول ۶-۲).

برای تخمین R_{lw} هم می‌توان از فرمول‌های زیر استفاده کرد.

$$R_{lw} = \sigma\, T^4 (0.56 - 0.08\sqrt{e})\,(0.1 + 0.9\,\frac{n}{N}) \qquad (۱۰-۶)$$

$$R_{lw} = (1.17 \times 10^{-7}) T^4 (0.56-0.08\sqrt{e})(0.1+0.9C) \qquad (۱۱-۶)$$

که σ ضریب استفان - بولتزمن (1.17×10^{-7} cal.cm^{-2} K^{-4} d^{-1})، T متوسط درجه حرارت هوا در ارتفاع استاندارد ۲ متری از سطح زمین (کلوین)، e فشار بخار آب در هوا (میلی بار) در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین بوده و n و N و C مقادیری هستند که قبلاً شرح داده شد. در فرمول ۶-۱۱ بجای $\frac{n}{N}$ از معیار درصد ابری بودن آسمان استفاده شده است.

آنچه در معادله ۶-۱۰ یا ۶-۱۱ ممکن است مشکل ایجاد کند بدست آوردن مقدار e می‌باشد که برای تخمین آن کافی است ابتدا به ازاء متوسط درجه حرارت فشار بخار اشباع را بر حسب میلی‌بار از جدول ۳-۸ بدست آورده و آن را در درصد رطوبت نسبی ضرب کرد. مثلاً چنانچه متوسط دمای هوا T = 12 °C و متوسط رطوبت نسبی ۴۵ درصد باشد فشار بخار اشباع از جدول ۳-۸ برابر ۱۳/۹۹ میلی‌بار بوده (۱۳/۹۹ = ۱/۳۳ × ۱۰/۵۲) و لذا مقدار e (فشار بخار) برابر ۶/۲۹ میلی‌بار می‌باشد (۶/۲۹ = ۰/۴۵ × ۱۳/۹۹) که باید در معادله ۶-۱۱ بجای e قرار داده شود.

جدول ۶-۲ حداکثر ساعات آفتابی ممکن (N) در ماههای مختلف برای عرضهای جغرافیایی مختلف

عرض جغرافیایی	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
50 °N	8.5	10.1	11.8	13.8	15.4	16.3	15.9	14.5	12.7	10.8	9.1	8.1
48	8.8	10.2	11.8	13.6	15.2	16.0	15.6	14.3	12.6	10.6	9.3	8.3
46	9.1	10.4	11.9	13.5	14.9	15.7	15.4	14.2	12.6	10.9	9.5	8.7
44	9.3	10.5	11.9	13.4	14.7	15.4	15.2	14.0	12.6	11.0	9.7	8.9
42	9.4	10.6	11.9	13.4	14.6	15.2	14.9	13.9	15.6	11.1	9.8	9.1
40	9.6	10.7	11.9	13.3	14.4	15.0	14.7	13.7	12.5	11.2	10.0	9.3
35	10.1	11.0	11.9	13.1	14.0	14.5	14.3	13.5	12.4	11.3	10.3	9.8
30	10.4	11.1	12.0	12.9	13.6	14.0	13.9	13.2	12.4	11.5	10.6	10.2
25	10.7	11.3	12.0	12.7	13.3	13.7	13.5	13.0	12.3	11.6	10.9	10.6
20	11.0	11.5	12.0	12.6	13.1	13.3	13.2	12.8	12.3	11.7	11.2	10.9
15	11.3	11.6	12.0	12.5	12.8	13.0	12.9	12.6	12.2	11.8	11.4	11.2
10	11.6	11.8	12.0	12.3	12.6	12.7	12.6	12.4	12.1	11.8	11.6	11.5
5	11.8	11.9	12.0	12.2	12.3	12.4	12.3	12.3	12.1	12.0	11.9	11.8
0	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1

فرمول دیگری نیز برای محاسبه R_{nw} بکار می‌رود که عبارت است از :

$$R_{nw} = \sigma \left[T_s^4 - (0.51 + 0.066\sqrt{e})\, T_2^4 \right] (1 - a\, C) \qquad (۱۲-۶)$$

در این فرمول:

σ = ضریب استفان - بولتزمن (1.17×10^{-7} cal.cm^{-2} K^{-4} d^{-1})

T_s = دمای سطح آب (کلوین)

e = فشار بخار هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (میلی بار)

T_2 = دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (کلوین)

a = ضریب ثابتی که بستگی به درجه ابری بودن هوا دارد و مقدار آن برای روزهای با درجه ابری زیاد، متوسط و کم به ترتیب ۰/۲۵، ۰/۶ و ۰/۹ می‌باشد.

C = درجه ابری بودن هوا (اعشار)

در فرمول فوق بجای 1 - a C می‌توان 0.1 + 0.9 C یا $0.1 + 0.9 \frac{n}{N}$ نیز قرار داد در این صورت خواهیم داشت :

$$R_{nw} = \sigma \left[T_s^4 - (0.51 + 0.066\sqrt{e})\, T_2^4 \right] (0.1 + 0.9\, C) \qquad (۱۳-۶)$$

تفاوت معادلات ۶-۱۱، ۶-۱۲ و ۶-۱۳ به دلیل تجربی بودن آنهاست.

● **مثال ۶-۱**

حساب کنید مقادیر R_s و R_{rs} را روی یک دریاچه برای روز ۸ ماه اوت در محلی که عرض جغرافیایی آن ۴۰ درجه شمالی باشد. در ابتدا مساله را برای یک روز کاملاً صاف و سپس برای روزی که درجه ابری بودن ۴۰ درصد است حل نمایید.

حل

$$R_s = R_a (0.803 - 0.340\ C - 0.458\ C^2)$$

برای حالت اول $C = 0$ و R_a از جدول ۶-۱ برای ماه اوت ۸۷۰ کالری بر سانتی متر مربع در روز بدست می‌آید لذا:

$$R_s = 870\ (0.803)$$

$$R_s = 698.6\ cal.cm^{-2}.d^{-1}$$

حال چنانچه ضریب بازتاب تابش روی سطح آب 0.07 (۷ درصد) باشد خواهیم داشت:

$$R_{rs} = R_s\ (\alpha) = 698.6(0.07) = 48.9\ cal.cm^{-2}.d^{-1}$$

برای حالتی که درصد ابری بودن ۴۰ باشد ($C = 0.4$):

$$R_s = 870\ [(0.803 - 0.340\ (0.40) - 0.458\ (0.16)]$$

$$R_s = 516.5\ cal.cm^{-2}.d^{-1}$$

و برای محاسبه R_{rs} خواهیم داشت:

$$R_{rs} = 516.5\ (0.07)$$

$$R_{rs} = 36.2\ cal.cm^{-2}.d^{-1}$$

● **مثال ۶-۲**

حساب کنید مقدار تابش خالص ورودی به سطح یک دریاچه (R_n) را در شرایط زیر:

- روز ۸ اوت
- عرض جغرافیایی ۴۰ درجه شمالی
- درجه ابری بودن ۴۰ درصد
- دمای هوا در ارتفاع ۲ متری ۳۰ درجه سانتی گراد
- رطوبت نسبی ۶۰ درصد
- دمای سطح آب ۲۰ درجه سانتی گراد

حل

$$R_n = R_s - R_{rs} - R_{lw}$$

R_s و R_{rs} مطابق مثال ۶-۱ برابر ۵۱۶/۵ و ۳۶/۲ کالری بر سانتی متر مربع در روز محاسبه شده‌اند:

$R_s = 516.5\ cal.cm^{-2}.d^{-1}$

$R_{rs} = 36.2\ cal.cm^{-2}.d^{-1}$

برای محاسبه R_{lw} از فرمول ۶-۱۲ استفاده می‌کنیم.

$$R_{lw} = \sigma \left[T_s^4 - (0.51 + 0.066\sqrt{e})\, T_2^4 \right] (0.1 + 0.9\, C)$$

که در آن :

$\sigma = 1.17 \times 10^{-7}\ cal.cm^{-2}.K^{-4}.d^{-1}$

$T_s = 273 + 20 = 293$

$T_2 = 273 + 30 = 303$

$e = (e_s)(RH)$

RH رطوبت نسبی (۶۰ درصد) و e_s فشار بخار اشباع در دمای ۳۰ درجه است که مقدار آن از جدول ۳-۹ معادل ۳۱/۸۲ میلی‌مترجیوه یا ۴۲/۳۲ میلی‌بار بدست می‌آید. لذا

$e = 42.32\ (0.6) = 25.4\ mb$

$C = 0.4$

بااین عوامل R_{lw} ازفرمول ۶-۱۳ معادل ۱۴/۴ کالری بر سانتی متر مربع بر روزبدست‌می‌آید.

$R_{lw} = 14.4\ cal.cm^{-2}.d^{-1}$

$R_n = R_s - R_{rs} - R_{lw}$

$R_n = 516.5 - 36.2 - 14.4 = 465.9\ cal.cm^{-2}.d^{-1}$

● **مثال ۶-۳**

دمای آب در سطح یک دریاچه در یک روز معین ۱۰ درجه سانتی گراد و چگالی آب یک گرم بر سانتی متر مکعب بوده است. شار تابش خالص ورودی به سطح دریاچه (R_n) برابر ۴۶۵/۹ کالری بر سانتی متر مربع در روز می‌باشد (از مثال ۶-۲) حساب کنید در این روز چه میزان تبخیر از سطح دریاچه صورت گرفته است.

$$E = \frac{R_n}{\rho_w(L_v)}$$

$R_n = 465.9$

$\rho_w = 1$

$L_v = 597.3 - 0.564\ (10)$

$L_v = 591.6\ cal.g^{-1}$

$$E = \frac{465.9}{1(591.6)} = 0.79\ cm.d^{-1} = 7.9\ mm/day$$

۶-۳ تبخیر از سطح آزاد آب

در هیدرولوژی برآورد مقدار تبخیر از سطوح آزاد آب معمولاً برای محاسبه تلفات آب در مخازن صورت می‌گیرد. در این فرایند فرض می‌شود که همیشه آب برای تبخیر وجود داشته باشد. یعنی موجودیت آب بیش از توان تبخیر محیط باشد. برای برآورد تبخیر از سطح آب روشهای مختلفی بکار می‌رود که از آن جمله می‌توان روشهای بیلان آب، تشت تبخیر و استفاده از فرمول‌های تجربی را نام برد.

۶-۳-۱ روش بیلان آب

اگر در مورد یک توده آب مانند حجم آبی که در مخازن سدها وجود دارد عواملی مانند مقدار بارندگی روی سطح مخزن، حجم آب ورودی و خروجی از مخزن، نفوذ آب به‌جدار و کف مخزن و تغییرات آب در آن مشخص باشد هیدرولوژیست قادر خواهد بود از روی معادله بیلان آب مقدار تبخیر از سطح آب را در یک دوره زمانی مشخص که عوامل فوق برای آن در نظر گرفته می‌شوند، محاسبه کند. معادله بیلان آب به شرح زیر است.

$$E = P + (I - O) - \Delta S \qquad (۱۴-۶)$$

P = بارندگی روی مخزن در دوره زمانی مورد نظر

I = مقدار آب ورودی به مخزن

O = مقدار آب خروجی از مخزن

E = تبخیر از سطح مخزن

ΔS = تغییرات حجم آب در مخزن در دوره زمانی مورد نظر (در صورت افزایش حجم، مثبت و در صورت کاهش حجم منفی در نظر گرفته می‌شود)

● **مثال ۶-۴**

جریان ورودی به مخزن یک سد طی ماه مهر بطور متوسط ۴۰۰ لیتر در ثانیه و جریان خروجی از آن یک متر مکعب در ثانیه بوده است. بررسی رابطه تراز سطح آب مخزن و حجم آن نشان می‌دهد که سطح آب مخزن در روز اول مهر ۲۵۰ هکتار و حجم آب موجود در آن ۷۸ میلیون مترمکعب و در روز آخر مهرماه سطح مخزن ۲۱۶ هکتار و حجم آب موجود در آن ۷۶ میلیون مترمکعب بوده است. بارندگی طی این مدت ۱۶ میلی‌متر گزارش شده است. حساب کنید حجم و ارتفاع آب تبخیر شده از سطح مخزن را طی ماه مهر و متوسط ارتفاع تبخیر درهر یک از روزهای این ماه را.

حل

حجم آب ورودی به مخزن = $I = \frac{400}{1000} \times 86400 \times 30 = 1,036,800$ مترمکعب

حجم آب خروجی از مخزن = $O = 1 \times 86400 \times 30 = 2,592,000$ مترمکعب

تغییرات حجم = $\Delta S = 76 - 78 = -2$ میلیون‌مترمکعب $= -2,000,000$ مترمکعب

بارندگی روی مخزن = $P = \left(\frac{16}{1,000}\right) \times \left(\frac{250 + 216}{2}\right)\left(10,000\right) = 37,280$ مترمکعب

$E = P + (I - O) - \Delta S$

$E = (37280) + [(1,036,800) - (2,592,000)] - (- 2,000,000) = 482,080$ مترمکعب

متوسط سطح مخزن = $\frac{250 + 216}{2} = 233$ هکتار

$= 2,330,000$ مترمربع

ارتفاع آب تبخیر شده = $\frac{482,080}{2,330,000} = 0.2069$ متر

ارتفاع آب تبخیر شده = $0.2069 \times 1000 = 206.9$ میلی‌متر

ارتفاع تبخیر در هر روز = $\frac{206.9}{30} = 6.89 \approx 7$ میلی‌متر

● **مثال ۶-۵**

در منطقه‌ای مشابه آنچه در مثال ۶-۴ گفته شد داده‌های زیر در یک دوره ۱۵ روزه در ماه مهر از مخزن یک سد بدست آمده است. آیا این مخزن دارای تلفات آب از طریق نفوذ به جدار و کف می‌باشد یا خیر (بارندگی روی مخزن صفر بوده است).

- حجم آب ورودی به مخزن طی ۱۵ روز ۸۲۵،۰۰۰ متر مکعب
- حجم آب دریافت شده از مخزن طی ۱۵ روز ۱،۴۳۰،۰۰۰ مترمکعب
- سطح آب دریاچه سد در ابتدای دوره ۱۵ روزه ۱۶۰ هکتار
- سطح آب دریاچه سد در انتهای دوره ۱۵ روزه ۱۴۰ هکتار
- حجم آب موجود در مخزن در ابتدای دوره ۱۵ روزه بر اساس رابطه یا منحنی ارتفاع - حجم مخزن ۸۳ میلیون مترمکعب
- حجم آب موجود درمخزن در انتهای دوره ۱۵ روزه بر اساس منحنی ارتفاع - حجم مخزن ۸۱/۵ میلیون مترمکعب

حل

$I = 825,000$ مترمکعب

$O = 1,430,000$ مترمکعب

چون متوسط تبخیر ۷ میلی‌متر در روز است لذا مقدار آن در طی ۱۵ روز از سطح مخزن برابر است با :

$$E = \left(\frac{7}{1000}\right)\left(\frac{160+140}{2}\right)\left(10{,}000\right) = 10500 \quad \text{متر مکعب (روزانه)}$$

$$E = 10500 \times 15 = 157500 \quad \text{مترمکعب (دوره ۱۵ روزه)}$$

تغییرات حجم مخزن برابر است با:

$$\Delta S = 81.5 - 83 = -1.5 \quad \text{میلیون مترمکعب} = -1{,}500{,}000 \quad \text{مترمکعب}$$

با توجه به معادله بیلان آب در مخزن چون بارندگی (P) روی مخزن صفر است لذا:

آب ورودی به مخزن = آب خروجی از مخزن

$$E - O = P + I + \Delta S + \text{تلفات از درز و ترکها}$$

$$(-1{,}500{,}000) + (825{,}000) - (1{,}430{,}000) = 0 + (157{,}500) + \text{تلفات از درز و ترکها}$$

$$\text{تلفات از درز و ترکها} = 597{,}500$$

بنابراین فرار آب از درز و ترکهای مخزن وجود داشته و مقدار آن ۵۹۷،۵۰۰ مترمکعب طی ۱۵ روز است و یا ۳۹۸۳۳ مترمکعب در روز است.

۶-۳-۲ روش تشت تبخیر

از روی آمار تشت تبخیر نیز می‌توان مقدار تبخیر از سطح آب را از معادله زیر تخمین زد.

$$E = K(E_{pan}) \qquad (۱۵-۶)$$

دراین معادله E تبخیر از سطح آزاد آب در مخازن یا دریاچه‌ها، E_{pan} مقدار تبخیر از تشت و K ضریب ثابتی است که مقدار آن برای تشت تبخیر استاندارد کلاس A (امریکایی) بین ۰/۵۸ تا ۰/۷۸ (بطور متوسط ۰/۷۰) می‌باشد.

ضریب تشت تبخیر برای ماههای مختلف سال را می‌توان از جدول ۶-۳ تخمین زد ملاحظه می‌شود که مقدار ضریب تشت در ماههای زمستان کم و در ماههای گرم سال به دلیل جذب حرارت خورشید توسط توده آب دریاچه‌ها و در نتیجه بالا رفتن مقدار تبخیر از سطح آزاد آب این ضریب بزرگتر می‌شود که این تفاوت زیاد چشمگیر نمی‌باشد.

جدول ۶-۳ ضریب تشت کلاس A برای برآورد تبخیر از سطح آزاد آب

ماه	ضریب	ماه	ضریب
ژانویه	0.60	ژوئیه	0.77
فوریه	0.70	اوت	0.77
مارس	0.72	سپتامبر	0.77
آوریل	0.73	اکتبر	0.70
مه	0.74	نوامبر	0.63
ژوئن	0.76	دسامبر	0.60

● مثال ۶-۶

مقدار تبخیر از تشت کلاس A طی ماه مهر در یک منطقه بطور متوسط ۶/۵ میلی‌متر در روز است. برای یک درباچه کوچک که سطح آب در آن طی این ماه ۷ هکتار می‌باشد مقدار تلفات تبخیر چقدر است. ضریب تشت را ۰/۷۳ در نظر بگیرید.

حل

$E_{pan} = 6.5$ mm/day

$K = 0.73$

$E = K(E_{pan}) = 0.73(6.5) = 4.74$ mm/day

$E = 4.74 \times 30 = 142.2$ mm/month

$$E = \left(\frac{142.2}{1000}\right)\left(7 \times 10{,}000\right) = 9954 \text{ m}^3$$

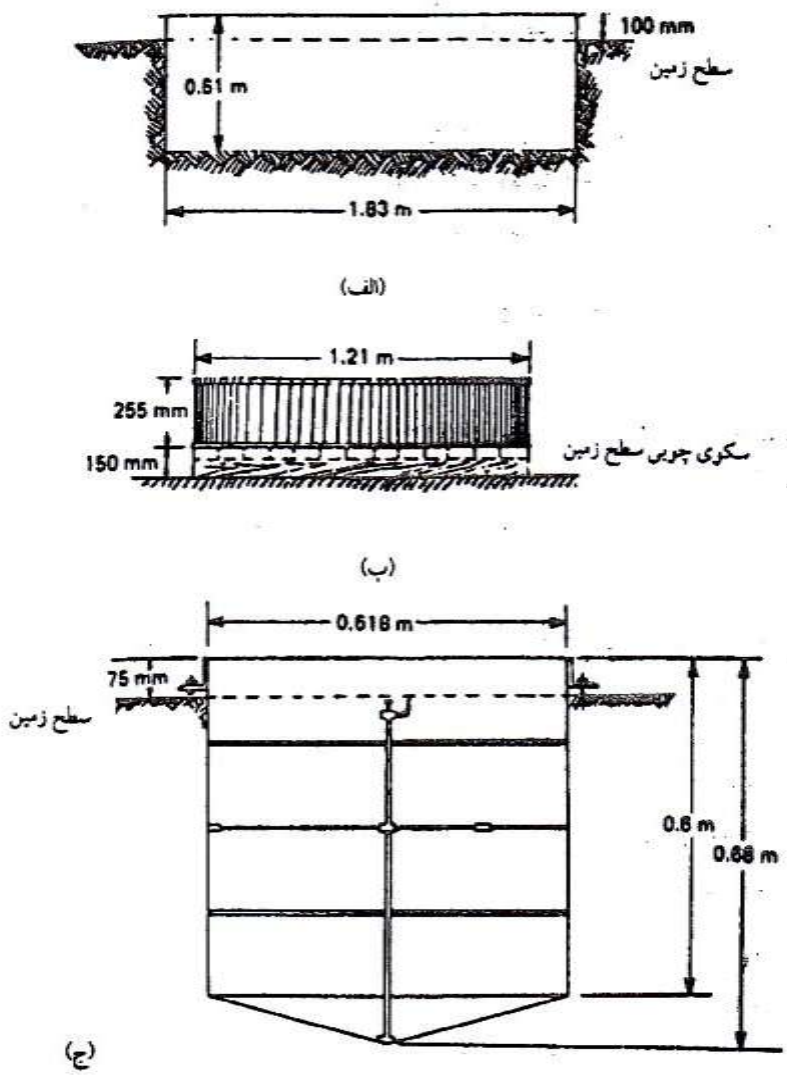
آنچه در مورد معادله ۶-۱۵ گفته شد مربوط به تبخیر از تشت کلاس A می‌باشد و اگر آمار تبخیر مربوط به نوعی دیگری از تشت باشد برای آن صادق نخواهد بود. هرچند در ایستگاههای هواشناسی ایران تبخیر تنها با استفاده از تشت کلاس A اندازه‌گیری می‌شود اما در مطالعات هیدرولوژی داده‌های تشت ممکن است از سه نوع باشد که عبارتند از:

الف ـ تشت استاندارد انگلیسی

ب ـ تشت کلاس A (استاندارد امریکایی)

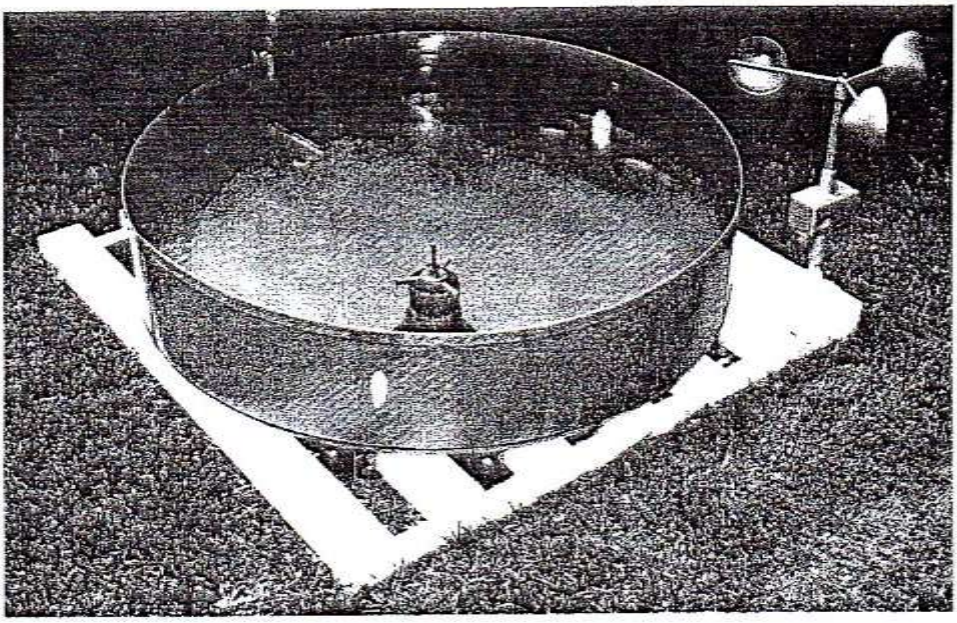
ج ـ تشت استاندارد روسی

تشت نوع انگلیسی و روسی در داخل خاک نصب می‌شوند حال آنکه تشت کلاس A روی سکوی چوبی و در سطح زمین کار گذاشته می‌شود. مزیت تشت کلاس A این است که اگر تشت سوراخ شده باشد بسادگی قابل رؤیت و تعمیر است. ولی چون سطح آب در آن در فاصله‌ای بالاتر از سطح زمین قرار گرفته است به دلیل بیشتر بودن سرعت باد در ارتفاع بالاتر، تبخیر حاصله از تشت کمی بیشتر از مقدار واقعی تبخیر است. جنس این تشت از آهن گالوانیزه است و به دلیل گرم شدن باعث افزایش درجهٔ حرارت آب می‌شود که آن نیز موجب افزایش تبخیر می‌گردد. ابعاد هر یک از انواع تشتها در شکل ۶-۱ داده شده است. تجربه نشان داده است که نسبت تبخیر از تشت روسی یا انگلیسی به مقدار تبخیر از تشت کلاس A امریکایی حدود ۰/۷۸ می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مقدار تبخیر از تشت روسی یا انگلیسی تقریباً معادل مقدار تبخیر از سطح آزاد آب می‌باشد. مشکل اساسی در این تشتها آن است که به دلیل قرار گرفتن در زیر زمین نمی‌توان از سوراخ نبودن آنها اطمینان پیدا کرد.



شکل ۶-۱ انواع مختلف تشتهای تبخیر (الف) تشت مربعی استاندارد انگلیسی (ب) تشت استاندارد امریکایی کلاس A (ج) تشت استاندارد روسی

همانطورکه گفته شد در ایستگاه‌های هواشناسی ایران تنها وسیله اندازه‌گیری تبخیر تشت کلاس A می‌باشد که روی سکوی چوبی قرار می‌گیرد (شکل ۶-۲). در داخل این تشت‌ها استوانه کوچکی قرار داده می‌شود تا آب وارد آن شده و سطح آب در آن ثابت باقی بماند. تعیین سطح آب توسط اندازه‌گیر قلاب شکل (hook gage) انجام شده و برخی از آن‌ها مجهز به دماسنج‌های حداکثر و حداقل و یک بادسنج فنجانی برای اندازه‌گیری سرعت باد می‌باشند.



شکل ۶-۲ تشت تبخیر کلاس A و طرز قرار گرفتن آن روی سکوی چوبی. قطر این تشت ۴۷/۵ اینچ و عمق آب در آن ۱۰ اینچ می‌باشد.

۶-۳-۳ معادله‌های تجربی

کوششهای زیادی بعمل آمده است تا فرمول‌ها و معادله‌های عملی و ساده‌ای برای تخمین تبخیر از سطح آزاد آب ارائه شود. از جمله فرمول‌های ارائه شده که در کارهای هیدرولوژی از آنها استفاده می‌شوند عبارتند از:

$$E = 0.35(e_s - e_d)(0.5 + U_2/100) \qquad (۱۶-۶)$$

در این فرمول E تبخیر از سطح آزاد آب (میلی‌متر در روز)، e_s و e_d به ترتیب فشار بخار اشباع و فشار واقعی بخار آب (برحسب میلی‌متر جیوه) و $e_s - e_a$ کمبود فشار بخار و U_2 سرعت متوسط روزانه باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (برحسب میل در روز) می‌باشد. برای استفاده در معادله ۶-۱۶ لازم است ابتدا مقدار $e_s - e_d$ که بنام کمبود فشار بخار معروف است محاسبه شود. کمبود فشار بخار با در دست داشتن متوسط دمای روزانه (T) و متوسط رطوبت نسبی (RH) از معادله زیر قابل محاسبه است.

$$e_s - e_d = \left[\exp\left(\frac{16.78\,T - 116.9}{T + 237.3}\right)\right](1 - RH/100) \qquad (۱۷-۶)$$

در این فرمول T برحسب درجه سلسیوس، RH برحسب درصد و $e_s - e_d$ برحسب کیلو پاسکال می‌باشد. مثلاً چنانچه رطوبت نسبی هوا در یک روز مشخص ۷۶/۵ درصد و متوسط دما ۲۲

درجه سلسیوس باشد $e_d - e_a$ برابر است با:

$$e_s - e_d = \left[\exp\left(\frac{16.78\,(22) - 116.9}{22 + 237.3}\right)\right]\left(1 - \frac{76.5}{100}\right)$$

$$e_s - e_d = (2.645)(0.235) = 0.62\ \text{KPa}$$

چون هر کیلو پاسکال (KPa) برابر ۷/۵ میلی‌متر جیوه است بنابراین مقدار $e_s - e_d$ برابر ۴/۶۵ میلی‌متر جیوه می‌باشد.

$$e_s - e_d = 0.62 \times 7.5 = 4.65\ \text{mm(Hg)}$$

● **مثال ۶-۷**

متوسط دمای هوا در یک روز از ماه مهر ۲۲ درجه، رطوبت نسبی ۴۵ درصد و سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین ۲۷۵ کیلومتر در روز بوده است. مقدار تبخیر از سطح دریاچه مخزن یک سد که در آن منطقه واقع شده است در آن روز چقدر تخمین زده می‌شود.

حل

$$e_s - e_d = \left[\exp\left(\frac{16.78\,(22) - 116.9}{22 + 237.3}\right)\right]\left(1 - \frac{45}{100}\right)$$

$$e_s - e_d = 1.45\ \text{KPa}$$

$$e_s - e_d = 1.45 \times 7.5 = 10.9\ \text{mm(Hg)}$$

$$U_{10} = 275\ \text{km/day} = 275/1.609 = 171\ \text{mile/day}$$

با استفاده از معادله تبدیل سرعت باد معادله (۳-۱۱) از ارتفاع ۱۰ متری به ارتفاع ۲ متری خواهیم داشت

$$\left(\frac{U_2}{U_{10}}\right) = \left(\frac{Z_2}{Z_{10}}\right)^{0.15}$$

$$U_2 = 171\left(\frac{2}{10}\right)^{0.15}$$

$$U_2 = 134.3\ \text{mile/day}$$

حال از معادله ۶-۱۶ مقدار تبخیر از سطح دریاچه برابر است با

$$E = 0.35(10.9)\left(0.5 + \frac{134.3}{100}\right) = 7.0\ \text{mm/day}$$

معادله تجربی دیگری نیز برای محاسبه تبخیر وجود دارد که در آن از روش انتقال مواد (mass transfer method) برای محاسبهٔ تبخیر آب از سطح مخازن و یا دریاچه سدها استفاده شده است. این معادله که در زیر شرح داده شده است برای مخازنی که سطح آنها از ۰/۵ هکتار تا ۱۲۰۰۰ هکتار بوده است مورد آزمایش قرارگرفته و نتایج آن مطلوب بوده است.

$$E = 0.291(A^{-0.05})(U_2)(e_s - e_d) \qquad (۱۸-۶)$$

در این رابطه:

E = تبخیر از سطح آب (میلی‌متر در روز)

A = مساحت سطح مخزن آب یا دریاچه (مترمربع)

U_2 = سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (متر در ثانیه)

e_s = فشار بخار اشباع در روز یا دوره مورد نظر (میلی‌بار)

e_d = فشار واقعی بخار آب در روز یا دوره موردنظر (میلی بار)

باتوجه به این که $e_s - e_d$ (کمبود فشار بخار) بستگی به دما و رطوبت نسبی هوا دارد مقدار آن را می‌توان از معادله ۶-۱۷ بدست آورد.

● مثال ۶-۸

حساب کنید تلفات آب از سطح یک دریاچه را در وضعیتی که مساحت آن ۵ کیلومترمربع، سرعت متوسط باد در ارتفاع ۲ متری ۱۰/۳ کیلومتر در ساعت، فشار بخار اشباع ۱۴/۲ میلی‌متر جیوه و فشار واقعی بخار آب ۱۱ میلی‌متر جیوه باشد.

حل

با توجه به این‌که فشار هر میلی‌متر جیوه معادل ۱/۳۳ میلی‌بار می‌باشد خواهیم داشت.

$A = 5\ km^2 = 5 \times 1000^2$ مترمربع

$U_2 = 10.3\ km/hr = 2.86\ m/sec$

$e_s = 14.2\ mm,Hg = 14.2 \times 1.33 = 18.9\ mb$

$e_d = 11.0\ mm,Hg = 11.0 \times 1.33 = 14.6\ mb$

$E = 0.291\ (5 \times 1000^2)^{-0.05} \times 2.86(18.9 - 14.6) = 1.66\ mm/day$

بنابراین در وضعیت مذکور مقدار تبخیر از سطح دریاچه ۱/۶۶ میلی‌متر است. اگر آن را برای کل سال تعمیم دهیم ۶۰۶ میلی‌متر آب از دریاچه تبخیر می‌شود که با توجه به سطح ۵ کیلومتر مربعی آن، مقدار سالانه تبخیر ۳/۰۳ میلیون متر مکعب خواهد بود.

علاوه بر معادله‌های فوق فرمول‌ها و معادلات تجربی دیگری نیز برای محاسبه تبخیر از سطح مخازن و دریاچه‌ها ارائه شده است که بعضاً در طرح‌های هیدرولوژی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این فرمول‌ها که در زیر به برخی از آنها اشاره شده است، کلاً بر اساس کمبود فشار بخار ($e_s - e_a$) یا معادله دالتون (Dalton) استوار می‌باشند. در معادلات زیر e_s و e_a به ترتیب فشار بخار اشباع و فشار بخارواقعی بر حسب میلی‌متر جیوه و سرعت باد(U) بر حسب کیلومتر در ساعت درارتفاع ۲ متری‌ازسطح‌زمین‌می‌باشدکه‌دراین صورت E بر حسب میلی‌متر در روز بدست می‌آید.

۱- فرمول مایر (Meyer)

$$E = \left(1 + \frac{U}{16}\right) . C . (e_s - e_a) \qquad (۶-۱۸ \text{ الف})$$

در فرمول مذکور مقدار C ضریبی است که برای دریاچه‌ای عمیق ۰/۳۶ و برای دریاچه‌های کم عمق ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود. مثلاً با توجه به شرایط مسأله ۶-۷ که در آن سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری ۲۷۵ و در سطح زمین حدود ۲۱۶ کیلومتر در روز و کمبود فشار بخار ۱۰/۹ میلی‌متر جیوه می‌باشد برای یک دریاچه که عمق متوسط داشته و ضریب C در آن ۰/۴ در نظر گرفته شود مقدار تبخیر ۶/۸ میلی‌متر در روز بدست می‌آید. زیرا:

$U = 216 \text{ km/d} = 9 \text{ km/hr}$

$e_s - e_a = 10.9 \text{ mm(Hg)}$

$C = 0.4$

$$E = \left(1 + \frac{9}{16}\right) (0.4) (10.9) = 6.8 \text{ mm/d}$$

۲- فرمول دفتر عمران امریکا (USBR)

$$E = 0.833 (4.57 t + 43.3) \qquad (۶-۱۸ \text{ ب})$$

در این معادله t متوسط ماهانه دمای هوا بر حسب درجه سانتی‌گراد و E بر حسب میلی‌متر در ماه می‌باشد. مشاهده می‌شود که این فرمول بسیار کلی و فقط بر اساس درجه حرارت می‌باشد.

۳- فرمول هفنر (Hefner)

$$E = 0.028 U (e_s - e_a) \qquad (۶-۱۸ \text{ ج})$$

۴- فرمول شاهتین (Shahtin)

$$E = (0.116 + 0.017 U) (e_s - e_a) \qquad (۶-۱۸ \text{ د})$$

۷- فرمول مارسیانو (Marciano)

$$E = 0.03 U (e_s - e_a) \qquad (۶-۱۸ \text{ ه})$$

بطوریکه ملاحظه می‌شود در صورت اطلاع از دمای هوا، رطوبت نسبی و سرعت باد می‌توان مقدار تبخیر از سطح آزاد آب را به صورت تجربی تخمین زد. مثلاً اگر دمای سطح آب ۲۲ درجه سانتی‌گراد باشد e_s معادل ۲۰ میلی‌متر جیوه بوده و چنانچه رطوبت نسبی ۳۵ درصد باشد e_a برابر ۷ میلی‌متر جیوه است. لذا $e_s - e_a = 13$ خواهد بود. با سرعت باد به میزان ۱۵ کیلومتر در ساعت مقدار تبخیر از سطح آب بر اساس فرمول مایر برای یک دریاچه عمیق ($C = 0.36$) برابر ۹ میلی‌متر در روز، بر اساس فرمول هفنر ۵/۴ میلی‌متر در روز، بر اساس فرمول شاهتین ۴/۸ میلی‌متر در روز و بر اساس فرمول مارسیانو ۵/۸ میلی‌متر در روز محاسبه می‌شود. بطوری که ملاحظه می‌شود فرمول مایر مقدار تبخیر را حدود ۲ برابر سایر روشها تخمین می‌زند.

۶-۴ تبخیر از سطح برف

تبخیر از سطوح پوشیده از برف به دلیل دمای بسیار پائین محیط، انعکاس شدید تابش از سطح سفید برف و بالا بودن رطوبت نسبی هوا بسیار اندک است بهمین دلیل در مطالعات هیدرولوژی معمولاً از آن صرف نظر می‌شود. با این وجود در آزمایشگاههای تحقیقات برف و یخ، روشها و معادله‌های تجربی زیادی برای تخمین تبخیر از سطح برف ارائه شده است که از جمله معادله زیر است.

$$E = (0.18 + 0.098\ U_{10})(e_s - e_d) \qquad (۱۹-۶)$$

در این فرمول E تبخیر از سطح برف بر حسب میلی‌متر در روز، U_{10} سرعت متوسط باد در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین برحسب متر در ثانیه، e_s فشار بخار اشباع در سطح برف به ازاء متوسط دمای روزانه بر حسب میلی‌بار (mb) و e_d فشار واقعی بخار آب در ارتفاع ۲ متری از سطح برف برحسب میلی‌بار (mb) می‌باشد. بطور مثال با توجه به اعداد مثال ۶-۷ که در آن کمبود فشار بخار ۱۰/۹ میلی‌متر جیوه و سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری ۲۷۵ کیلومتر در روز می‌باشد اگر سطح حوضه پوشیده از برف باشد مقدار تبخیر از سطح برف برابر ۷/۲ میلی‌متر در روز می‌باشد. زیرا:

$e_s - e_a = 10.9 \quad mm(Hg) = 14.49\ mbar$

$U_{10} = 275\ km/d = 3.2\ m/s$

$E = [0.18 + 0.098\ (3.2)]\ (14.49)$

$E = 7.1\ mm/d$

اما همان طور که اشاره شد در سطوح پوشیده از برف اختلاف فشار بخار اشباع (e_s) و فشار واقعی بخار (e_d) بسیار کم و بهمین دلیل $e_s - e_d$ تقریباً صفر و لذا E بسیار ناچیز است.

● مثال ۶-۹

در یک روز آفتابی پس از بارش برف داده‌های زیر از ایستگاه هواشناسی منطقه موردنظر بدست آمده است. مقدار تبخیر از سطح برف در روز مذکور چقدر تخمین زده می‌شود.

- حداکثر دما ۱۲ °C در ارتفاع ۲ متری استاندارد هواشناسی
- حداقل دما در ارتفاع ۲ متری استاندارد هواشناسی ۶ °C
- سرعت باد در ارتفاع استاندارد ۱۰ متری ۲۵۵ کیلومتر در طی ۲۴ ساعت (روز)
- متوسط رطوبت نسبی ۷۰ درصد

حل

با استفاده از معادله ۶-۱۹ خواهیم داشت:

$$E = (0.18 + 0.098\ U_{10})(e_s - e_d)$$

$$U_{10} = 255\ km/day = 3\ m/sec$$

چون متوسط دمای روزانه در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین ۹ درجه سلسیوس است، با فرض این‌که دمای سطح برف نیز برابر ۹ درجه سلسیوس باشد مقدار فشار بخار اشباع یا e_s برابر خواهد بود.

$$e_s = \exp\left[\frac{16.78\ T - 116.9}{T + 237.3}\right] = \exp\left[\frac{16.78(9) - 116.9}{9 + 237.3}\right]$$

$$e_s = 1.14\ KPa$$

$$e_s = 1.14 \times 10$$

$$e_s = 11.4\ mb$$

برای محاسبه فشار واقعی بخار یا e_d با استفاده از معادله مربوط به رطوبت نسبی (معادله ۳-۲۲) مقدار آن قابل محاسبه است.

$$RH = \frac{e_d}{e_s} \times 100$$

$$e_d = \left(\frac{RH}{100}\right) e_s = \left(\frac{70}{100}\right)(1.14)$$

$$e_d = 0.79\ KPa$$

$$e_d = 0.79 \times 10$$

$$e_d = 7.9\ mb$$

در محاسبه e_d فرض شده است که دمای سطح زمین با دمای ارتفاع ۲ متری یکسان باشد. بنابراین کمبود فشار بخار ۳/۵= ۷/۹ - ۱۱/۴ بوده و مقدار تبخیر از سطح برف برابر است با:

$$E = (0.18 + 0.098 \times 3)(11.4 - 7.9)$$

$$E = 1.6\ mm/day$$

بدین‌ترتیب مقدار تبخیر از سطح برف در روز موردنظر ۱/۶ میلی‌متر تخمین زده می‌شود.

۶-۵ تبخیر از سطوح مرطوب خاک و گیاه

تبخیر از سطوح مرطوب خاک و گیاه در حوضه‌ها که آن را با نام تبخیر-تعرق توصیف کردیم یکی از پیچیده‌ترین فرایندها در چرخه هیدرولوژی است. زیرا علاوه بر عوامل مؤثر بر تبخیر که در بخشهای قبل ذکر شد عوامل دیگری مانند رطوبت خاک، درصد پوشش گیاهی و نوع گیاه نیز بر آن مؤثر است و چون این عوامل در طول زمان ثابت نیستند بهمین دلیل مقدار تبخیر - تعرق نیز متناسب با آن متغیر می‌باشد. تبخیر-تعرق در محاسبات هیدرولوژی از دو جهت حائزاهمیت است. یکی محاسبه تلفات آب در حوضه‌های آبریز و دیگری برآورد نیاز

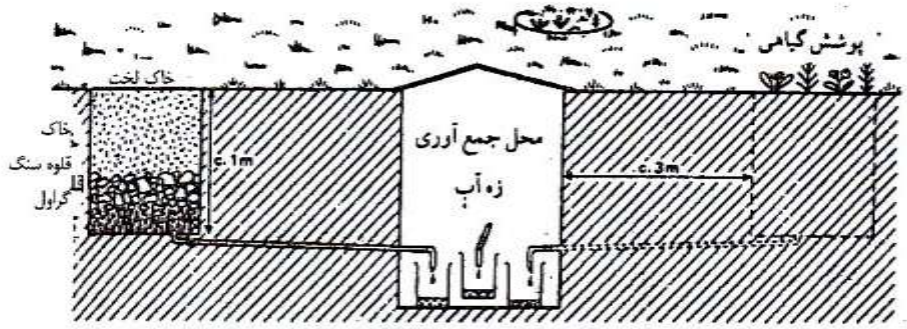
آبیاری در طرحهایی که آب مهار شده در سازه‌های هیدرولیک مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

۶-۵-۱ تبخیر-تعرق واقعی

تبخیر- تعرق واقعی به مجموعه تبخیر از سطح خاک و تعرق توسط پوشش گیاهی در شرایط طبیعی اطلاق می‌شود. اندازه‌گیری تبخیر-تعرق واقعی بسیار مشکل و عملاً غیر قابل اجراست. حتی در صورت‌انجام نیز نمی‌توان به نتایج حاصله اطمینان داشت. در ایستگاههای تحقیقاتی برای اندازه‌گیری تبخیر-تعرق واقعی از دستگاههایی به‌نام لایسی‌متر (lysimeter) استفاده می‌شود.

لایسی‌متر دستگاهی است که از سال ۱۶۸۸ در مطالعات مربوط به آب و خاک مورد استفاده داشته است. این دستگاه از یک تانک یا مخزن ساده تشکیل شده است که پر از خاک می‌باشد و با کاشت گیاه در آن و آبیاری می‌توان جمع مقدار آب تلف شده در اثر تبخیر-تعرق از سطح خاک و تعرق از سطح گیاه (تبخیر-تعرق) را در دوره‌های روزانه، هفته‌ای و یا ماهانه محاسبه کرد.

لایسی‌مترها انواع و اقسام مختلف دارند. برخی از آنهادارای زهکش می‌باشند (drainage lysimeter) . بطوریکه آب مازاد تانک توسط لوله زه‌کش مطابق شکل ۶-۳ در ظرف دیگری جمع و اندازه‌گیری می‌شود. بنابراین چنانچه در یک دوره معین مقدار آب زه‌کش شده را از مجموع آبی که بصورت آبیاری یابارندگی به تانک داده شده است کسر کنیم. حجم آبی که در سطح لایسی‌متر بمصرف تبخیر-تعرق رسیده است قابل محاسبه می‌باشد.



شکل ۶-۳ لایسی‌متر زه‌کش‌دار

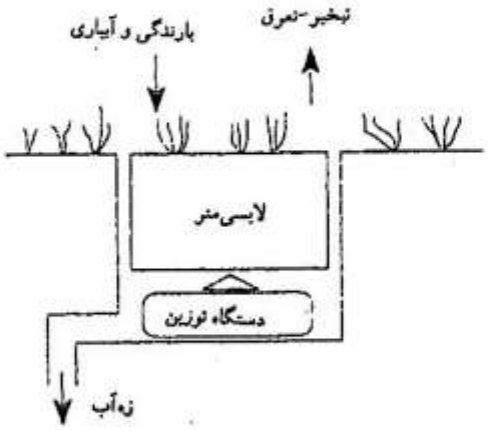
در برخی دیگر از لایسی‌مترها سطح ایستابی در داخل تانک با استفاده از خاصیت لوله‌های مرتبطه در حد معینی ثابت نگهداشته می‌شود تا آب از طریق لوله‌های موئین به بالا صعود

نموده و بمصرف تبخیر- تعرق برسد. بدین‌ترتیب از روی حجم آبی که برای ثابت نگهداشتن سطح ایستابی بمصرف رسیده است مقدار تبخیر- تعرق محاسبه می‌شود.

دقیق‌ترین نوع لایسی‌مترها انواع وزنی (weighting lysimeter) هستند که در آنها تانک محتوی خاک و گیاه روی دستگاه توزین دقیق (load cells) قرار گرفته و مقدار آبی که بمصرف تبخیر- تعرق رسیده است از روی کاهش وزن تانک بدست می‌آید. زیرا کاهش وزن تانک در طی یک دوره زمانی مشخص برابر با مقدار آبی است که یا بصورت زه آب از انتهای تانک در ظرف مخصوص تخلیه شده و یا اینکه بصورت تبخیر- تعرق از سطح تانک و گیاهان موجود در آن خارج شده است. لایسی‌مترهای وزنی را می‌توان به یک گلدان معمولی که روی کفه ترازو قرار داده شده است تشبیه کرد که در آن مقدار آب داده شده به گلدان و مقدار آبی که از ته گلدان خارج می‌شود اندازه‌گیری گردد. با توزین مرتب گلدان و از روی مقادیر آب داده شده و خارج شده از گلدان می‌توان مقدار آبی را که بمصرف تبخیر- تعرق رسیده است محاسبه نمود. شکل ۶-۴ تصویر ساده یک لایسی متر وزنی را نشان می‌دهد.

در حال حاضر در ایران تعداد معدودی لایسی‌متر وزنی وجود دارد که می‌توان از آن‌ها برای واسنجی روش‌های تخمین تبخیر - تعرق استفاده کرد. از جمله این نوع لایسی‌مترها می‌توان به لایسی متر وزنی - الکترونیکی جهاد دانشگاهی کرمان اشاره کرد.

علاوه بر لایسی‌مترها، هیدرولوژیست‌ها همواره درصدد بوده‌اند تا روشهای ساده‌ای براساس داده‌های هواشناسی برای تخمین تبخیر-تعرق واقعی از سطح حوضه‌های آبریز ارائه نمایند. هرچند فرمول‌های زیادی برای تخمین تبخیر-تعرق واقعی ارائه شده ولی تمامی آنها دارای محدودیتهایی می‌باشند. از جمله‌این فرمول‌ها می‌توان معادله تورک (Turc) را نام برد.



شکل ۶-۴ لایسی متر وزنی

تورک براساس تجربیات خود و نتایج حاصله از مطالعات دیگر محققان فرمولی را پیشنهاد نمود که بوسیلهٔ آن می‌توان تبخیر - تعرق واقعی سالانه را در یک حوضهٔ آبریز تخمین زد. این فرمول به‌صورت زیر است:

$$E = \frac{P}{[0.90 + (P/I)^{2}]^{0.5}} \qquad (۶-۲۰)$$

در این فرمول:

E- تبخیر واقعی سالانه برحسب میلی‌متر

P- بارندگی سالانه برحسب میلی‌متر

I- عامل مربوط به دمای متوسط سالانه هوا است که مقدار آن برابر است با

$$I = 300 + 25\,T + 0.05\,T^{3} \qquad (۶-۲۱)$$

T- متوسط درجهٔ حرارت سالانه برحسب °C

● **مثال ۶-۱۰**

در یک حوضه آبریز که میانگین سالانه بارندگی در آن ۲۵۵ میلی‌متر و متوسط دمای سالانه ۱۱ درجه سلسیوس است مقدار واقعی تبخیر-تعرق از سطح این حوضه چقدر تخمین زده می‌شود.

حل

$P = 255$ mm

$T = 11$ °C

$I = 300 + 25\,T + 0.05\,T^{3}$

$I = 300 + 25(11) + 0.05(11)^{3}$

$I = 641.55$

$$E = \frac{P}{[0.90 + (P/I)^{2}]^{0.5}} = \frac{255}{[0.90 + (255/641.55)^{2}]^{0.5}}$$

$$E = \frac{P}{[0.90 + (P/I)^{2}]^{0.5}} = 247 \text{ mm}$$

بطوریکه در مثال بالا مشاهده می‌شود بر طبق فرمول تورک از ۲۵۵ میلی‌متر بارندگی سالانه ۲۴۷ میلی‌متر آن صرف تبخیر-تعرق (۹۷ درصد) شده و بقیه ممکن است صرف تغذیه آبهای زیرزمینی یا مصارف دیگر شود. بنظر می‌رسد فرمول تورک در زمانی که مقدار بارندگی زیاد باشد تبخیر-تعرق واقعی را زیاد تخمین می‌زند و لذا استفاده از آن باید با احتیاط صورت گیرد. امروزه کاربردی‌ترین روش برای اندازه‌گیری تبخیر - تعرق واقعی استفاده از روش‌های

سنجش از دور و تصاویر ماهواره‌ای است. تصاویر برخی از ماهواره‌ها از دقت زمانی و برخی دیگر از دقت مکانی خوب برخوردارند. از جمله ماهواره‌هائی که می‌توان نـام بـرد MODIS و ASTER می‌باشند که از یکی از آن‌ها می‌توان تصاویر روزانه را از یک نقطه دریافت کرد اما دقت مکانی آن پائین است و برعکس ماهواره دیگر دارای تصاویری است که دقت مکانی بالا داشته و می‌تواند تا مساحت ۱۰ هکتار هم دقت داشته باشد ولی به لحاظ زمانی فاصله تصویربرداری نسبتاً زیاد و بیش از ۲ هفته می‌باشد. لذا با ترکیب و تلفیق این تصاویر و استفاده از روش‌های ریز مقیاس‌سازی (down scalling) و کاربرد مدل‌ها و الگوریتم‌های توازن انرژی در سطح زمین مانند الگوریتم سیبال SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) این امکان وجـود دارد که تبخیر - تعرق از سطح یک حوضه را بصورت واقعی پایش و اندازه‌گیری کرد. از آنجایی که بدست آوردن تبخیر-تعرق واقعی کاری بسیار مشکـل مـی‌باشد در هـیدرولوژی مـعمولاً تبخیر-تعرق پتانسیل بعنوان نمایه توان تبخیری محل بکار برده می‌شود. پس از بدست آوردن تبخیر-تعرق پتانسیل با ضرب کردن آن در ضریبی که بستگی به شرایط طبیعی و نوع گیاه دارد می‌توان تبخیر-تعرق واقعی گیاه را تخمین زد.

۶-۵-۲ تبخیر-تعرق پتانسیل

نظر به اینکه فرمول‌های تبخیر-تعرق واقعی معمولاً به نتایج مطلوبی منتهی نمی‌شوند و استفاده از لایسی‌متر نیز در تمام شرایط امکان‌پذیر نیست. در هیدرولوژی بجای تبخیر-تعرق واقعی توان تبخیر-تعرق منطقه را تخمین می‌زنند که آن را تبخیر-تـعرق پـتانسیل مـی‌گویند. روشهای غیرمستقیم و متعددی برای این منظور پیش‌بینی شده است کـه مـعادله‌های تـجربی تخمین تبخیر-تعرق پتانسیل (PET) از جمله آنهاست. *تبخیر- تعرق پتانسیل* حـداکـثر مـقدار تبخیر- تعرقی است که در یک وضعیت آب و هوایی مشخص در صورتی که محدودیتی از نظر آب وجود نداشته باشد از یک پوشش کامل گیاهی مانند چمن صـورت مـی‌گیرد. بسـیاری از طبقه‌بندیهای اقلیمی بجای استفاده از تبخیر-تعرق واقعی بر مبنای مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل می‌باشند.

در هیدرولوژی برای محاسبه تبخیر- تعرق پتانسیل چند روش عمده مورد استفاده قـرار مـی‌گیرد کـه عـبارتند از روش‌هـای *تـرنت‌وایت* (Thornthwaite) ، *پـنمن، لاری- جـانسون* و *جنسن - هیز*.

روش ترنت‌وایت در روش ترنت‌وایت تبخیر - تعرق پتانسیل برای هر یک از ماههای سال محاسبه می‌شود. اساس این روش دمای متوسط ماهانه است که بصورت زیر عمل می‌شود.

الف ـ ابتدا نمایه حرارتی (im) برای هر یک از ماههای سال از معادله زیر محاسبه می‌شود.

$$i_m = \left(\frac{T_m}{5}\right)^{1.51} \qquad (۲۲-۶)$$

در این معادله i_m نمایه حرارتی هر ماه و T_m متوسط دمای هوا (°C) در ماه موردنظر می‌باشند. این کار برای تمام ۱۲ ماه سال انجام می‌گردد. در صورتی که متوسط دمادر یک ماه صفر یا منفی باشد i_m برای آن ماه صفر در نظر گرفته می‌شود.

ب ـ نمایه حرارتی سال (I) را از جمع نمایه‌های حرارتی ماهانه طی سال بدست آورید.

$$I = \sum_{n=1}^{12} i_m \qquad (۲۳-۶)$$

ج ـ با داشتن نمایه حرارتی سالانه (I) ضریب a را از معادله زیر محاسبه کنید.

$$a = (6.75 \times 10^{-7})\, I^3 - (7.71 \times 10^{-5})\, I^2 + (1.792 \times 10^{-2})\, I + 0.492 \qquad (۲۴-۶)$$

د ـ برای هر یک از ماههای سال تبخیر - تعرق پتانسیل (PET) برحسب میلی‌متر از فرمول زیر محاسبه می‌شود.

$$PET = 16\left(\frac{10\, T_m}{I}\right)^a \qquad (۲۵-۶)$$

هـ ـ محاسبه PET بااستفاده از معادله فوق برای هر یک از ماهها با این فرض بوده است که هر ماه ۳۰ روز و هر روز ۱۲ ساعت روشنایی داشته باشد، حال آن‌که تعداد روزهای هر ماه و تعداد ساعات روشنایی در ماههای مختلف سال متفاوت است. بنابراین لازم است PET با اعمال ضریب N_m که مقادیر آن برای ماههای مختلف مطابق جدول ۶-۴ می‌باشد اصلاح گردد. لذا PET برابر خواهد بود با:

$$PET = 16\, N_m\left(\frac{10\, T_m}{I}\right)^a \qquad (۲۶-۶)$$

جدول ۶-۴ مقادیر ضریب اصلاحی (N_m) در معادله ترنت‌وایت برای عرضهای (شمالی) مختلف جغرافیایی در ماههای میلادی سال

عرض جغرافیایی	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Non	Dec
0°	1.04	0.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04
10°	1.00	0.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	0.98	0.99
20°	0.95	0.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	0.93	0.94
30°	0.90	0.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.20	1.14	1.03	0.98	0.89	0.88
35°	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	0.97	0.86	0.85
40°	0.84	0.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	0.96	0.83	0.81
45°	0.80	0.81	1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	0.94	0.79	0.75
50°	0.74	0.78	1.02	1.15	1.33	1.36	1.37	1.25	1.06	0.92	0.76	0.70

● **مثال ۶-۱۱**

تبخیر-تعرق پتانسیل را برای ماه شهریور در نقطه‌ای با مشخصات دمایی که در جدول زیر

ارائه شده است به روش ترنت‌وایت محاسبه کنید. عرض جغرافیایی ۳۵ درجه شمالی می‌باشد.

ماههای شمسی	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
دما °C	۵/۵	۱۲	۱۸	۲۵	۲۸	۲۳	۱۸	۱۰	۷	۳	-۴	-۲

حل

ـ ابتدا نمایه حرارتی ماهانه برای هر یک از ماههای سال از فرمول $i_m = \left(\frac{T_m}{5}\right)^{1.51}$ محاسبه می‌شود. مثلاً در ماه فروردین خواهیم داشت: $i_m = \left(\frac{5.5}{5}\right)^{1.51} = 1.15$، به همین ترتیب نمایه حرارتی کلیهٔ ماهها محاسبه می‌شود. ارقام محاسبه شده در جدول زیر نوشته شده است.

ماه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
i_m	۱/۱۵	۳/۷۵	۶/۹۱	۱۱/۳۶	۱۳/۴۸	۱۰/۰۱	۶/۹۱	۲/۸۵	۱/۶۶	۰/۴۶	۰	۰

دقت شود که برای مواردی که دمای هوا زیر صفر (در ماههای ۱۱ و ۱۲) است نمایه حرارتی صفر منظور شده است.

ـ نمایه حرارتی سال از معادله ۶-۲۳ محاسبه می‌شود.

$$I = \sum_{n=1}^{12} i_m$$

$$I = 1.15 + 3.75 + 6.91 + ... + 0.46 + 0 + 0 = 58.5$$

ـ ضریب a از فرمول ۶-۲۴ محاسبه شود

$$a = (6.75 \times 10^{-7})58.5^3 - (7.71 \times 10^{-5})58.5^2 + (1.792 \times 10^{-2})58.5 + 0.492 = 1.41$$

ـ ضریب اصلاحی N_m از جدول ۶-۴ برای ماه شهریور (سپتامبر) و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه برابر ۱/۰۳ بدست می‌آید.

ـ از معادله ۶-۲۶ مقدار اصلاح شده تبخیر-تعرق پتانسیل در ماه شهریور محاسبه می‌شود.

$$PET = 16(1.03)\left(\frac{10 \times 3}{58.5}\right)^{1.41} = 113.6 \text{ mm}$$

بنابراین جمع تبخیر-تعرق پتانسیل ماه شهریور ۱۱۳/۶ میلی‌متر و یا بطور متوسط ۳/۷ میلی‌متر در روز است.

در روش ترنت‌وایت، در صورتی که نیاز به جمع تبخیر -تعرق سالانه باشد باید محاسبات مربوطه برای هر یک از ماههای سال انجام و سپس با یکدیگر جمع شوند. مثلاً در جدول ۶-۵ محاسبات تبخیر- تعرق پتانسیل برای منطقه‌ای با عرض جغرافیایی ۴۲ درجه شمالی و مشخصات دمایی مطابق ستون (۱) انجام شده است. نظربه این که نمایه حرارتی سالانه (I) ۳۷/۵ و ضریب a معادل ۱/۰۹۳ می‌باشد، تبخیر- تعرق پتانسیل سالانه ۵۸۰/۳ میلی‌متر است.

جدول ۶-۵

(1) ماه	(2) میانگین دما Tm(°C)	(3) $i = \left(\frac{Tm}{5}\right)^{1.51}$	(4) PET اصلاح نشده(×)	(5) Nm ضریب اصلاحی	(6) PET اصلاح شده
Jan.	-18.6	-	-	0.84	-
Feb.	-14.9	-	-	0.83	-
Mar.	-1.5	-	-	1.03	-
Apr.	4.6	0.88	20.0	1.11	22.2
May	14.2	5.00	70.1	1.26	88.3
Jun.	24.2	10.81	122.7	1.23	151.0
Jul.	21.3	8.92	106.7	1.25	133.3
Aug.	19.7	7.93	98.0	1.17	114.6
Sep.	10.6	3.11	50.0	1.03	51.5
Oct.	4.6	0.88	20.0	0.97	19.4
Nov.	0.0	-	-	-	-
Dec.	-9.3	-	-	-	-
سال		I = 37.5			580.3

(×) باتوجه به اینکه a = 1.093 می‌باشد.

روش پنمن در سال ۱۹۴۸ **پنمن** (Penman) دانشمند انگلیسی از ترکیب معادلات انرژی و آیرودینامیک فرمولی را برای تخمین تبخیر-تعرق پتانسیل (PET) پیشنهاد نمود که بعداً فرمول او توسط عده زیادی از متخصصان هیدرولوژی و آب و خاک مورد استفاده و حک و اصلاح قرار گرفت که نامهای مختلفی بخودگرفت مانند روش پنمن - **رایت** (Penman-Right)، روش **پنمن - فائو** (Penman-FAO)، **پنمن - کیمبرلی** (Penman-Kimberly)، **پنمن - مونتیت** (Penman-Monteith) و غیره که شرح تمامی آنها بدلیل طولانی بودن مطلب امکان‌پذیر نیست و ما در اینجا فقط به ذکر روش پنمن - فائو که کاربرد زیادتری دارد می‌پردازیم. برای محاسبه تبخیر - تعرق پتانسیل به روش پنمن فائو از معادله زیر استفاده می‌شود:

$$PET = \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_n + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} (0.27)(1.0 + 0.01\, U_2)(e_s - e_d)\right] \qquad (۲۷-۶)$$

همانطور که مشاهده می‌شود در روش پنمن - فائو برای تعیین تبخیر - تعرق می‌بایست پارامترهای نسبتاً زیادی در دست باشد که در زیر برخی از روشهایی که می‌توان براساس آنها اجزای معادله مذکور را تخمین زد ذکر شده است. بعضی از این پارامترها با عدد و برخی دیگر بصورت فرمول توصیف شده‌اند. هرچند این فرمول‌ها و اعداد تجربی هستند ولی از دقت کافی برخوردارند. این پارامترها عبارتند از:

الف - Δ یا شیب منحنی فشار بخار آب [Δ(mb/°C)] نسبت به درجه حرارت.

با داشتن مقدار دمای هوا می‌توان Δ را از معادله زیر بدست آورد.

$$\Delta = 2.00(0.00738\, T_{mean} + 0.8072)^7 - 0.00116 \qquad (۲۸-۶)$$

که در آن:

T_{mean} = میانگین دمای هوا در دوره زمانی موردنظر، °C می‌باشد

ب ـ γ یا ضریب رطوبتی، سایکرومتریک (γ (mb/°C)

ضریب رطوبتی رابطه بین کمبود فشاربخار آب با تفاوت دمای تر و خشک است. از نظر کاربردی مقدار γ برابر است با:

$$\gamma = 1.6134 \frac{P}{L} \qquad (۲۹-۶)$$

که P فشار هوا و L گرمای نهان تبخیر است. برحسب تجربه مقادیر P و L عبارتند از:

$$P = 1013 - 0.1055(E) \qquad (۳۰-۶)$$

$$L = 2500.78 - 1.3601\ T_{mean} \qquad (۳۱-۶)$$

که در آنها:

P = فشار هوا برحسب میلی‌بار، mb

L = گرمای نهان تبخیر، KJ/Kg

E = ارتفاع از سطح دریا، m

T_{mean} = درجه حرارت هوا (متوسط)، °C

ج ـ فشار بخار اشباع، (بر حسب میلی‌بار) e_s

فشاربخار اشباع تابعی از درجه حرارت است این تابع بصورت زیر توصیف شده است:

$$e_s = 33.8639[(0.00738T_{mean} + 0.8072)^8 - 0.000019(1.8T_{mean} + 48) + 0.001316] \qquad (۳۲-۶)$$

که T_{mean} میانگین دمای هوا برحسب سانتی‌گراد است.

د ـ تابش خالص (R_n ،(mm/d

مقدار تابش خالص برابر است با:

$$R_n = (1 - \alpha)R_s - R_b \qquad (۳۳-۶)$$

α = آلبیدو (ضریب بازتاب تابش خورشید) که در فرمول پنمن ـ FAO مقدار آن ۰/۲۵ در نظر گرفته می‌شود.

R_s = تابش‌ورودی خورشید با طول موج کوتاه که می‌توان آن را از معادله ۶-۹ بدست آورد.

R_b = تابش خروجی از زمین بصورت طول موج بلند.

مقدار R_s از معادله زیر نیز بدست می‌آید.

$$R_s = \left(a + b\frac{n}{N}\right)R_{so} \qquad (۳۴-۶)$$

مقادیر a و b ضرایب محلی هستند که برای هر منطقه باید محاسبه شوند. بطور متوسط $a = 0.35$ و $b = 0.61$ در نظر گرفته می‌شوند. لذا:

$$R_s = \left(0.35 + 0.61\frac{n}{N}\right)R_{so} \qquad (۳۵-۶)$$

که در آن:

n = تعداد ساعات واقعی آفتاب در روز.

N = حداکثر ساعات آفتابی ممکن در روزکه مقادیر آن برای ماههای مختلف سال و عرضهای جغرافیایی متفاوت در جدول ۶-۲ داده شده است.

R_{so} = حداکثر ممکن تابش ورودی خورشید به سطح زمین در هوای صاف بدون ابر که مقادیر آن برای ماهها و عرضهای جغرافیایی مختلف در جدول ۶-۶ داده شده است. مقدار R_{so} حدوداً ۷۵ درصد مقدار تابش خورشیدی در بالای اتمسفر (اعداد جدول ۶-۱) است.

مقدار تابش R_b (تابش خروجی از سطح زمین بصورت طول موج بلند) از فرمول زیر قابل محاسبه است:

$$R_b = \left(a\frac{R_s}{R_{so}} - b\right)R_{bo} \qquad (۳۶-۶)$$

a و b برای هر محل می‌بایست برآورد شوند، امّا بطور تقریبی مقادیر آنها به ترتیب برابر با ۱/۲ و ۰/۲ می‌باشند.

$$R_{bo} = \varepsilon\sigma(T_{max}^4 + T_{min}^4)/2 \qquad (۳۷-۶)$$

در این فرمول‌ها:

R_{bo} = تابش خروجی خالص $KJ/m^2(d)$

σ = ضریب ثابت استفان-بولتزمن $4.8995 \times 10^{-3}\ J/m^2.d.K^4$

T_{max} = حد اکثر دمای هوا، درجه کلوین $(K = °C + 273)$

T_{min} = حداقل دمای هوا، درجه کلوین $(K = °C + 273)$

ε = ضریب تابش سطح که مقدار آن برابر است با:

$$\varepsilon = -0.02 + 0.261\exp[-7.77 \times 10^{-4}(T_{mean})^2] \qquad (۳۸-۶)$$

که در آن T_{mean} متوسط درجه حرارت می‌باشد، °C.

هـ ـ کمبود فشار بخار ($e_s - e_a$ برحسب میلی‌بار، mb)

e_s از معادله ۶-۳۲ محاسبه شده وسپس e_d از فرمول زیر بدست می‌آید:

$$e_d = e_s(RH_{mean}/100) \qquad (۳۹-۶)$$

سپس با داشتن e_s و e_d مقدار $e_s - e_d$ محاسبه می‌شود.

و ـ سرعت باد در طول ساعات روز در ارتفاع ۲ متری

این پارامتر با توجه به نسبت سرعت باد در روز به شب بدست می‌آید. اگر سرعت باد در ارتفاع ۲ متری در دست نبود از معادله $U_{2m} = U_z[2.0/Z]^{0.15}$ استفاده می‌شود در این‌صورت با داشتن سرعت باد در ارتفاع Z سرعت باد در ارتفاع ۲ متری بدست می‌آید.

جدول ۶-۵ حداکثر ممکن تابش ورودی خورشید به سطح زمین (R_{so}) برای ماهها و عرضهای جغرافیایی مختلف در صورت صاف بودن هوا (کالری بر سانتی‌متر مربع در روز). برای تبدیل کالری بر سانتی‌متر مربع در روز به میلی‌متر آب قابل تبخیر اعداد جدول بر ۵۸/۵ تقسیم شود

عرض جغرافیایی	ماه											
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
60 °N	58	152	319	533	671	763	690	539	377	197	87	35
55	100	219	377	558	690	780	706	577	430	252	133	74
50	155	290	429	617	716	790	729	616	480	313	193	126
45	216	365	477	650	729	797	748	648	527	371	160	190
40	284	432	529	677	742	800	755	674	567	426	323	248
35	345	496	568	700	742	800	761	697	603	474	380	313
30	403	549	600	713	742	793	755	703	637	516	437	371
25	455	595	629	720	742	780	745	703	660	561	486	423
20	500	634	652	720	726	760	729	697	680	597	537	474
15	545	673	671	713	706	733	706	684	697	623	580	519
10	584	701	681	707	684	700	681	665	707	648	617	565
5	623	722	690	700	652	663	645	645	710	665	650	606
0	652	740	694	680	623	627	616	623	707	681	680	619

روش لاری - جانسون لاری - جانسون (Lawry - Johnson) یک رابطه خطی را بین تبخیر-تعرق پتانسیل (PET) و گرمای مؤثر به شرح زیر پیشنهاد نموده‌اند:

$$PET = (0.004755\ D_m + 24.4) \qquad (۴۰-۶)$$

در این معادله D_m مقدار درجه - روز تجمعی دماهای ماکزیمم روزانه برای دوره مورد نظر (فصل غیر یخبندان) می‌باشد. لازم به ذکر است D_m بر حسب درجه فارنهایت محاسبه می‌شود .در اینصورت PET بر حسب سانتی‌متر به دست می‌آید.

● مثال ۶-۱۲

اگر متوسط حداکثر دمای روزانه در ماههای فروردین ، اردیبهشت و خرداد به ترتیب ۲۰، ۲۶ و ۳۰ درجه باشد تبخیر-تعرق پتانسیل با استفاده از روش لاری - جانسون چقدر است.

حل

درجه‌های ۲۰ ، ۲۶ و ۳۰ سانتی‌گراد بر حسب درجه فارنهایت به ترتیب ۶۸ و ۷۸ و ۸۶ خواهد بود و لذا:

$D_m = (68 + 78 + 86) 31 = 7192$

$PET = 0.004755 \times 7192 + 24.4$

$PET = 58.59$ cm

معادله جنسن - هیز با بررسی بیش از ۳۰۰۰ آمار مشاهده شده که طی ۳۵ سال جمع‌آوری شده بودند، جنسن و هیز (Jensen - Haise) معادله زیر رابرای تعیین تبخیر-تعرق پتانسیل (PET) که معادل تبخیر-تعرق مرجع گیاه یونجه می‌باشد ارائه نمودند.

$$PET = C_t (T - T_c) R_a \qquad (۴۱-۶)$$

که در آن:

$$C_t = \frac{1}{C_1 + 7.6 C_H} \qquad (۴۲-۶)$$

$$C_H = 50/(e_2 - e_1) \qquad (۴۳-۶)$$

$$C_1 = 38 - (2°C \times \text{Elevation}) / 305 \qquad (۴۴-۶)$$

R_a = تابش آفتاب بر حسب میلی‌متر در روز در قسمت بالای اتمسفر برای دوره مورد نظر

e_2 = فشار بخار اشباع به ازاء متوسط حداکثر دما در گرمترین ماه سال (میلی بار)

e_1 = فشار بخار اشباع به ازاء متوسط حداقل دما در گرمترین ماه سال (میلی‌بار)

T = متوسط دمای هوا (سانتی‌گراد)

T_c = از معادله زیر محاسبه می‌شود

$$T_c = -2.5 - 0.14 (e_2 - e_1) - \frac{\text{ارتفاع متوسط منطقه (متر)}}{550} \qquad (۴۵-۶)$$

● مثال ۶-۱۳

با توجه به داده‌های زیر تبخیر-تعرق پتانسیل را به روش جنسن-هیز برای ماه اردیبهشت محاسبه کنید

- متوسط حداکثر دمای روزانه در گرمترین ماه سال ۳۰ درجه سانتی‌گراد
- متوسط حداقل دما در گرمترین ماه سال ۲۰ درجه سانتی‌گراد
- متوسط دمای هوا در ماه اردیبهشت ۱۵ درجه سانتی‌گراد
- ارتفاع منطقه از سطح دریا ۱۵۰ متر
- عرض جغرافیایی ۳۰ درجه شمالی

حل

از روی جدول ارائه شده مربوط به فشار بخار اشباع در فصل سوم (جدول ۳-۹) مقادیر e_2 و e_1 به شرح زیر بدست می‌آید:

$e_2 = 42.42$ mb (برای ۳۰ درجه)

$e_1 = 23.4$ mb (برای ۲۰ درجه)

$$C_H = \frac{50}{(42.42 - 23.4)} = 2.63$$

$$C_1 = 38 - (\frac{2 \times 150}{305}) = 37$$

$$C_2 = \frac{1}{(37 + 7.6 \times 2.63)} = 0.017$$

$$T_c = -2.5 - 0.14\,(42.42 - 23.40) - \frac{150}{550} = -5.44$$

مقدار R_a برای عرض جغرافیایی ۳۰ درجه شمالی و برای ماه اردیبهشت (ماه مه)از جدول ۶-۱ برابر ۹۴۵ کالری بر سانتی‌متر بر روز می‌باشد که با توجه به ضریب تبدیل ۵۸/۵ می‌توان آن را به میلی‌متر در روز تبدیل کرد.

$$R_a = 945\ \text{Cal/cm}^2\text{.day} = \frac{945}{58.5} = 16.15\ \text{mm/d}$$

بنابراین خواهیم داشت:

$$PET = 0.017 \times [15 - (-5.44)] \times 16.15$$

$$PET = 5.6\ \text{mm/day}$$

$$PET = 5.6 \times 31 = 173\ \text{mm}$$

۶-۵-۳ تبخیر-تعرق گیاه مرجع

براساس روشهای استاندارد موجود برای محاسبه نیاز آبی در طرحهای آب بجای محاسبه تبخیر-تعرق پتانسیل مفهوم دیگری به نام **تبخیر-تعرق گیاه مرجع** (reference crop) بکار می‌رود که با علامت اختصاری ET_o نشان داده می‌شود. اصطلاح گیاه مرجع که ابتدا توسط پنمن و سپس پروت (Pruitt) و همکاران وی در هنگام تهیه دستورالعمل معروف به FAO-24 برای تخمین نیاز آبی گیاهان بکار برده شده بصورت زیر تعریف شده است. «تبخیر و تعرق از یک سطح فرضی پوشیده شدهٔ کامل از چمن کوتاه به ارتفاع ۸ تا ۱۰ سانتی‌متر که وسعت آن بسیار زیاد باشد و بدون آنکه دارای آفات یا بیماری باشد در وضعیتی که در محدودیت آبی از نظر مصرف قرار نداشته باشد، فعالانه رشد داشته باشد» گرچه ابتدا فقط گیاه مرجع چمن تعریف شده بود اما سپس فرمول‌های دیگری با توجه به گیاه مرجع یونجه (روش پنمن ـ رایت) یا گیاه مرجع فرضی (روش پنمن ـ مونتیت) نیز برای محاسبه ET_o ارائه گردید.

در حال حاضر حداقل ۲۰ روش عمده برای محاسبه ET_o وجود دارد که براساس مقایسه نتایج حاصله از آنها با نتایج بدست آمده از دستگاههای لایسی‌متر وزنی دقیق در ۱۱ نوع شرایط آب و هوائی مختلف در سطح دنیا برخی از آنها از نظر مطابقت با مقادیر واقعی در اولویت قرار دارند. در بررسی مقایسه‌ای روش موسوم به *فائو - پنمن ـ مونتیت* چه در شرایط آب و هوایی خشک و چه در شرایط آب و هوایی مرطوب در ردیف اول قرار دارد. بهمین دلیل سازمان فائو روش مذکور را بعنوان استاندارد برای محاسبه نیاز آبی گیاهان معرفی نموده و نرم‌افزار مربوط به محاسبات آن را تحت عنوان CROPWAT دراختیار قرار داده‌است. که بر اساس روش موسوم به فائو-پنمن-مونتیت می‌باشد. روش دیگری که در محاسبه ET_o درطرحهای هیدرولوژی از آن استفاده می‌شود روش *بلانی ـ کریدل اصلاح شده* توسط سازمان فائو (FAO-Blaney-Criddle) است که به دلیل ساده بودن و اینکه نیاز به داده‌های کمتری دارد هنوز هم مورد استفاده قرار می‌گیرد. بخصوص اینکه روش مذکور برای مناطق خشک مطلوب می‌باشد. روش موسوم به *هارگریوز* (Hargreaves) نیز که در آن فقط به داده‌های دما نیاز می‌باشد از روش‌های دیگر محاسبه تبخیر-تعریق گیاه مرجع است. فرمول پنمن-فائو مقدار تبخیر- تعرق را در مناطق مرطوب حدوداً ۳۵ درصد و در مناطق خشک ۸ درصد بیشتر از واقعیت بدست می‌دهد حال آنکه فرمول بلانی کریدل (FAO) برای مناطق خشک تقریباً با واقعیت منطبق است اما در مناطق مرطوب ۱۶ درصد بیش از واقعیت برآورد می‌کند. روش فائو - پنمن ـ مونتیت در مناطق خشک یک درصد کمتر از واقعیت و در مناطق مرطوب ۴ درصد بیشتر از واقعیت برآورد می‌کند. روش ترنت‌وایت چه در مناطق مرطوب (۴ درصد) و چه در مناطق خشک (۳۷ درصد) کمتر از واقعیت مقدار تبخیر- تعرق را بدست می‌دهد. نظر به اهمیت روشهای بلانی ـ کریدل و هارگریوز در اینجا به تشریح این روش‌ها می‌پردازیم:

روش بلانی ـ کریدل یکی از قدیم‌ترین روشهای تخمین تبخیر-تعرق پتانسیل روش بلانی - کریدل است که بعداً فرمول پیشنهادی آنها توسط پروت (Pruitt) از اساتید سابق دانشگاه کالیفرنیا مورد واسنجی قرارگرفت و برای تخمین تبخیر-تعرق گیاه مرجع چمن بصورت زیر ارائه شد.

$$ET_o = a + b\,[P(0.46T + 8.13)] \qquad (۴۶-۶)$$

ET_o = تبخیر و تعرق گیاه مرجع (چمن) برحسب میلی‌متر در روز (mm/d)

P = ضریب مربوط به طول روز یا درصد سالانه تابش آفتاب در ماه که بصورت روزانه توصیف شده است (متوسط ساعات روشنایی هر روز در ماه مورد نظر تقسیم بر کل ساعات روشنایی سال ضرب در ۱۰۰)

T = متوسط ماهانه درجه حرارت، °C

a و b = ضرایب اقلیمی

مقادیر P برای ماهها و عرضهای جغرافیایی مختلف در جدول ۶-۷ داده شده است. مثلاً مطابق این جدول اگر منطقه در عرض جغرافیایی ۳۵ درجه شمالی واقع شده باشد برای ماه سپتامبر مقدار P برابر ۰/۲۸ است.

ضرایب a و b بستگی به حداقل رطوبت نسبی هوا (RH_{min})، نسبت ساعات واقعی آفتاب (n) به حداکثر ممکن ساعات آفتابی (N) یعنی n/N و سرعت باد در روز (U_{day}) دارد. به عبارت دیگر a و b ضرایب اصلاحی روش پلانی - کریدل برای حداقل رطوبت هوا، تابش آفتاب و سرعت باد می‌باشند. در ایستگاههای هواشناسی RH_{min} از روی دماسنجهای تر و خشک تعیین می‌گردد. ساعات واقعی آفتاب در طول روز (n) توسط آفتاب نگار اندازه‌گیری می‌شود و مقدار N در هر نقطه بستگی به عرض جغرافیایی داشته که مقادیر آن برای ماههای مختلف در جدول ۶-۲ مشاهده می‌گردد.

مثلاً مطابق این جدول در نقطه‌ای که عرض جغرافیایی آن ۳۵ درجه شمالی باشد در ماه سپتامبر بطور متوسط هر روز می‌تواند حداکثر ۱۲/۴ ساعت آفتاب داشته باشد. حال اگر اندازه‌گیریهای آفتاب نگار نشان داده باشد که در هر روز ۸ ساعت آفتاب داشته‌ایم ($n = 8$) در این صورت نسبت $\frac{n}{N}$ برابر $\frac{8}{12/4} = 0/64$ خواهد بود.

سرعت باد در ایستگاههای هواشناسی معمولاً در ارتفاعات مختلف اندازه‌گیری می‌شود ولی آنچه در اینجا به عنوان استاندارد مورد استفاده قرار می‌گیرد سرعت در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین است.

مقادیر a و b را می‌توان از معادله‌های زیر بدست آورد:

$$a = 0.0043\,(RH_{min}) - \frac{n}{N} - 1.41 \qquad (۶-۴۷)$$

$$b = 0.82 - 0.0041(RH_{min}) + 1.07(n/N) + 0.066(U_{day}) - 0.006(RH_{min})\frac{n}{N} - 0.0006(RH_{min})(U_{day}) \qquad (۶-۴۸)$$

در این فرمول‌ها n تعداد ساعات واقعی آفتاب، N حداکثر ساعات ممکن تابش آفتاب، RH_{min} حداقل رطوبت نسبی (درصد) و U_{day} سرعت باد در طول روز در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (متر در ثانیه) است. چنانچه آمار اندازه‌گیری سرعت باد در ارتفاع دیگری مثلاً Z در اختیار باشد برای استفاده در فرمول لازم است سرعت باد در ارتفاع Z به سرعت باد در ارتفاع ۲ متری تبدیل شود برای این منظور از فرمول تجربی زیر که در بخشهای قبل توضیح داده شد (معادله ۳-۱۱) استفاده می‌شود.

$$U_{2m} = U_z\,[\,2.0 / Z\,]^{0.15} \qquad (۶-۴۹)$$

در فرمول فوق :

Z = ارتفاعی است که سرعت باد در آن اندازه‌گیری شده است

U_{2m} = سرعت باد در ارتفاع ۲ متری

U_z = سرعت باد در ارتفاع Z می‌باشد.

جدول ۶-۷ متوسط روزانه درصد ساعت روشنایی نسبت به کل ساعات روشنایی سال در ماههای مختلف (ضریب P برای استفاده در فرمول بلانی کریدل ـ FAO)

عرض جغرافیایی شمالی (درجه)	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
60°	.15	.20	.26	.32	.38	.41	.40	.34	.28	.22	.17	.13
58	.16	.21	.26	.32	.37	.40	.39	.34	.28	.23	.18	.15
56	.17	.21	.26	.32	.36	.39	.38	.33	.28	.23	.18	.16
54	.18	.22	.26	.31	.36	.38	.37	.33	.28	.23	.19	.17
52	.19	.22	.27	.31	.35	.37	.36	.33	.28	.24	.20	.17
50	.19	.23	.27	.31	.34	.36	.35	.32	.28	.24	.20	.18
48	.20	.23	.27	.31	.34	.36	.35	.32	.28	.24	.21	.19
46	.20	.23	.27	.30	.34	.35	.34	.32	.28	.24	.21	.20
44	.21	.24	.27	.30	.33	.34	.33	.31	.28	.25	.22	.20
42	.21	.24	.27	.30	.33	.34	.33	.31	.28	.25	.22	.21
40	22	.24	.27	.30	.32	.34	.33	.31	.28	.25	.22	.21
35	.23	.25	.27	.29	.31	.32	.32	.30	.28	.25	.23	.22
30	.24	.25	.27	.29	.31	.32	.31	.30	.28	.26	.24	.23
25	.24	.26	.27	.29	.30	.31	.31	.29	.28	.26	.25	.24
20	.25	.26	.27	.28	.29	.30	.30	.29	.28	.26	.25	.25
15	.26	.26	.27	.28	.29	.29	.29	.28	.28	.27	.26	.25
10	.26	.27	.27	.28	.28	.29	.29	.28	.28	.27	.26	.26
5	.27	.27	.27	.28	.28	.28	.28	.28	.28	.27	.27	.27
0	.27	.27	.27	.27	.27	.27	.27	.27	.27	.27	.27	.27

● مثال ۶-۱۴

برای روز اول ماه مه (۱۱ اردیبهشت) در منطقه‌ای با مشخصه‌های زیر مقدار تبخیر-تعرق گیاه مرجع را به روش بلانی ـ کریدل محاسبه کنید.

ـ عرض جغرافیایی lat = 35°N ، سرعت روزانه باد در ارتفاع دومتری $U_{2m\text{-}day}$ = 7.5 m/sec

ـ دمای حداکثر T_{max} = 21°C ، دمای حداقل T_{min} = 9.4°C

ـ تعداد ساعات آفتابی n = 10

ـ حداقل رطوبت نسبی RH_{min} = 48%

حل

باتوجه به عرض جغرافیایی برای روز اول ماه مه از جدول ۶-۲ مقدار N = 14 می‌باشد و

لذا خواهیم داشت:

$$\frac{n}{N} = \frac{10}{14} = 0.71$$

$$RH_{min} = 48\%$$

از معادله ۶-۴۷ مقدار a برابر ۱/۹۱- بدست می‌آید چون.

$$a = 0.0043(48) - 0.71 - 1.41 = -1.91$$

از معادله ۶-۴۸ مقدار b برابر ۱/۴۶ تعیین می‌گردد.

$$b = 0.82 - 0.0041(48) + 1.07(0.71) + 0.066(7.5) - 0.006(48)(0.71) - 0.0006(48)(7.5)$$

$$b = 1.46$$

از جدول ۶-۶ برای عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ماه مه مقدار $P = 0.31$ استخراج می‌گردد. میانگین دما برابر ۱۵/۲ درجه سانتی‌گراد است زیرا:

$$T = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} = \frac{21 + 9.4}{2}$$

$$T = 15.2°C$$

لذا مقدار ET_o برابر خواهد بود با (معادله ۶-۴۶).

$$ET_o = -1.91 + 1.46[0.31(0.46 \times 15.2 + 8.13)]$$

$$ET_o = 4.9 \text{ mm/day}$$

روش هارگریوز روش دیگری که در آن فقط به داده‌های دمای هوا نیاز می‌باشد روشی است که بنام هارگریوز (Hargreaves) یا هارگریوز - سامانی معروف است. در این روش لازم است برای دوره مورد نیاز دمای متوسط هوا (T) و تفاوت متوسط حداکثر و حداقل دما (TR) را در دوره مورد نظر داشته باشیم. سپس با داشتن تابش خورشیدی (R_a) مقدار تبخیر - تعرق (ET_o) بصورت زیر قابل محاسبه است. (تابش R_a از جدول ۶-۸ استخراج می‌شود).

$$ET_o = 0.0023\ R_a\ (T + 17.8)\ \sqrt{TR} \qquad (۶-۵۰)$$

در این معادله TR تفاوت حداکثر و حداقل دما ($TR = T_{max} - T_{min}$) بر حسب درجه سانتی‌گراد است. ET_o همان واحدی را خواهد داشت که برای R_a انتخاب خواهیم کرد. مثلاً اگر R_a بر حسب میلی‌متر در روز باشد ET_o نیز بر حسب میلی‌متر در روز بدست می‌آید. مقدار R_a از جدول ۶-۱ برای ماهها و عرضهای جغرافیایی مختلف قابل استخراج است. توجه داشته باشید که در جدول مذکور R_a بر حسب کالری بر سانتی‌متر بر روز است و اگر بخواهیم آن را بر حسب میلی‌متر در روز بدست آوریم باید ارقام این جدول را بر ۵۸/۵ تقسیم کنیم که در این صورت ET_o نیز بر حسب میلی‌متر در روز محاسبه می‌شود. برای استفاده از معادله ۶-۵۰ می‌توان مقدار R_a را بر حسب میلی‌متر در روز مستقیماً از جدول ۶-۸ نیز بدست آورد.

جدول ۶-۸ مقادیر R_a (تابش برون زمینی) بر حسب میلی‌متر آب قابل تبخیر در روز برای عرض‌های جغرافیایی مختلف در نیمکره شمالی

	درجه عرض شمالی									
ماه	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
Jan.	14.5	12.8	10.8	8.5	6.0	3.6	1.3	–	–	–
Feb.	15.0	13.9	12.3	10.5	8.3	5.9	3.5	1.1	–	–
Mar.	15.2	14.8	13.9	12.7	11.0	9.1	6.8	4.3	1.8	–
Apr.	14.7	15.2	15.2	14.8	13.9	12.7	11.1	9.1	7.8	7.9
May	13.9	15.0	15.7	16.0	15.9	15.4	14.6	13.6	14.6	14.9
Jun.	13.4	14.8	15.8	16.5	16.7	16.7	16.5	17.0	17.8	18.1
Jul.	13.5	14.8	15.7	16.2	16.3	16.1	15.7	15.8	16.5	16.8
Aug.	14.2	15.0	15.3	15.3	14.8	13.9	12.7	11.4	10.6	11.2
Sept.	14.9	14.9	14.4	13.5	12.2	10.5	8.5	6.8	4.0	2.6
Oct.	15.0	14.1	12.9	11.3	9.3	7.1	4.7	2.4	0.2	–
Nov.	14.6	13.1	11.2	9.1	6.7	4.3	1.9	0.1	–	–
Dec.	14.3	12.4	10.3	7.9	5.5	3.0	0.9	–	–	–

● **مثال ۶-۱۵**

تبخیر - تعرق مرجع را برای ماه اردیبهشت در منطقه‌ای که عرض جغرافیایی آن ۳۰ درجه شمالی است به روش هارگریوز بدست آورید. متوسط حداکثر دمای هوا در اردیبهشت ۲۷ و متوسط حداقل دما در این ماه ۱۶ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

حل

$$TR = T_{max} - T_{min} = 27 - 16 = 11\ ^\circ C$$

$$T = \frac{T_{max} - T_{min}}{2} = \frac{27 + 16}{2} = 21.5\ ^\circ C$$

از جدول ۶-۸ برای ماه اردیبهشت (مه) و عرض جغرافیایی ۳۰ درجه خواهیم داشت.

$$R_a = 16\ mm/day$$

$$ET_o = 0.0023\ R_a = (T + 18.7)\sqrt{TR}$$

$$ET_o = 0.0023 \times 16\ (21.5 + 18.7)\sqrt{11} = 4.9\ mm/d$$

۶-۶ محاسبه ضریب گیاهی

در تمام روشهایی که توسط آنها تبخیر - تعرق گیاه مرجع (ET_o) محاسبه می‌شود برای آنکه بتوان نتایج حاصله را به سطوح پوشش گیاهی موردنظر مانند پوشش‌های زراعی، مرتعی، باغات و یا جنگل تعمیم داد لازم است مقادیر بدست آمده را در ضریب گیاهی K_c ضرب نمود (معادله ۶-۵۱). ضریب گیاهی علاوه بر ET_o مقداربستگی به عواملی مانند نوع گیاه، مرحله رشد و شرایط آب و هوایی محل نیز دارد.

$$ET_{crop} = K_c\ (ET_o) \qquad (۵۱-۶)$$

باید توجه داشت که ضریب گیاهی یک مقدار ثابت نبوده و مقدار آن در طول دوره رویش گیاه تغییر می‌کند. برطبق پیشنهاد فائو مقادیر ضریب گیاهی در مرحله ابتدائی رشد (K_{c-ini})، مرحله میانی رشد (K_{c-mid}) و مرحله نهائی رشد (K_{c-end}) برای برخی از پوشش گیاهی در جدول ۶-۹ ارائه شده است. این ضرایب برای مواردی صادق است که بخواهیم تبخیر-تعرق مرجع را با روش فائو-پنمن محاسبه می‌کنیم (برای اطلاع بیشتر می‌توان به کتابهای آبیاری و یا روابط آب و خاک و گیاه مراجعه کرد).

برای محاسبه تبخیر - تعرق با استفاده از معادله هارگریوز نیز روشی که مشابه با روش قبلی است پیشنهاد شده است در محاسبه ضریب گیاهی به روش هارگریوز ضریب گیاهی برای اوایل دوره رشد، $(K_c)_1$، اواسط رشد $(K_c)_2$ و انتهای دوره رشد $(K_c)_3$ از جدول ۶-۱۰ استخراج می‌شود.

جدول ۶-۹ ضرایب گیاهی (K_c) در روش فائو-پنمن-مونتیت

نوع گیاه	ضریب گیاهی			حداکثر ارتفاع گیاه
	K_{c-ini}	K_{c-mid}	K_{c-end}	(h) متر
کاج و سرو	1.00	1.05	1.05	10
سیب	0.45	0.95	0.95	8
هلو	0.45	0.90	0.65	3
گلابی	0.45	0.90	0.90	4
زیتون	0.65	0.75	0.70	6-10
خرما	0.95	0.95	0.95	8
پسته	0.30	1.15	0.45	3-6
گردو	0.50	1.10	0.65	4-5
مرکبات	0.65	0.70	0.65	4
بادام	0.40	0.95	0.65	5
کیوی	0.30	1.05	1.05	3-5
انگور	0.30	0.85	0.45	2
چای	0.40	0.95	0.65	1.5
تمشک	0.30	1.05	0.50	1.5
پنبه	0.32	1.15	0.70	0.7-1.5
کتان	0.32	1.10	0.25	0.8
گلرنگ	0.32	1.15	0.25	1.0
آفتابگردان	0.32	1.15	0.32	2
گندم	0.30	1.15	0.25	1.0
جو	0.30	1.15	0.25	1.0
سورگوم	0.30	1.0	0.22	1.0
برنج	1.10	1.20	0.90	1.0
یونجه	0.40	1.20	1.15	0.7
نیشکر	0.40	1.25	0.75	3-4
جالیز	0.40	1.05	0.75	0.4
سبزیجات	0.40	1.15	0.80	0.8
چغندرقند	0.35	1.20	0.60	0.6

جدول ۶-۱۰ ضرایب گیاهی (K_c) برای استفاده از فرمول هارگریوز

Crop	$(K_c)_1$	$(K_c)_2$	$(K_c)_3$
یونجه	0.40-0.50	1.00-1.40	0.95-1.35
آرتیشو	0.90-1.00	0.95-1.05	0.90-1.00
مارچوبه	0.25-0.30	0.95	0.25
موز	0.40-0.65	1.00-1.20	0.75-1.15
جو	0.25-0.30	1.00-1.10	0.10-0.20
لوبیاسبز	0.30-0.40	0.95-1.05	0.50-0.95
لوبیا	0.30-0.40	1.05-1.20	0.25-0.30
چغندرلبویی	0.24-0.40	1.05-1.20	0.25-0.30
کلم	0.30-0.50	0.95-1.10	0.80-0.95
طالبی	0.15-0.40	1.00-1.10	0.30-0.90
هویج	0.40-0.50	1.05	0.75
جعفری	0.25-0.35	1.00-1.15	0.90-1.05
مرکبات	0.65	0.65-0.75	0.65
ذرت دانه‌ای	0.20-0.50	1.05-120	0.35-0.60
ذرت شیرین	0.20-0.50	1.05-1.20	0.70-0.80
پنبه	0.20-0.50	1.05-1.30	0.30-0.60
خیار	0.20-0.40	0.90-1.00	0.70-0.80
درختان میوه خزان شونده	0.50	0.85-1.20	0.50-0.85
باغات با پوشش زیر درختی	0.75-0.85	1.10-1.25	0.70-1.10
بادمجان	0.25-0.50	0.95-1.10	0.80-0.90
کنف	0.20-0.40	1.00-1.15	0.20-0.25
انگور	0.20-0.50	0.74-0.85	0.20-0.42
بادام زمینی	0.30-0.50	0.95-1.00	0.50-0.60
کیوی	0.30	1.05	1.05
عدس	0.20-0.30	1.05-1.20	0.25-0.30
کاهو	0.20-0.30	0.85-1.05	0.45
ارزن	0.20-0.40	1.00-1.15	0.25-0.30
چاودار	0.20-0.40	1.05-1.20	0.20-0.25
زیتون	0.60	0.80	0.80
پیاز	0.40-0.60	0.95-1.10	0.75-0.85
پیازچه	0.40-0.60	0.95-1.05	0.95-1.05
نخودسبز	0.40-0.50	1.05-1.20	0.95-1.10
فلفل	0.30-0.40	0.95-1.10	0.80-0.90
پسته	0.10	1.10	0.35
سیب‌زمینی	0.40-0.55	1.10-1.20	0.40-0.75
حبوبات	0.20-0.40	1.05-1.20	0.25-0.30
پرتقال	1.10-1.15	1.10-1.30	1.10
گلرنگ	0.30-0.40	1.05-1.20	0.20-0.25
غلات	0.20-0.40	1.10-1.30	0.20-0.35
سورگوم	0.15-0.40	1.05-1.20	0.30-0.50
سویا	0.30-0.40	1.00-1.15	0.45-0.55
اسفناج	0.20-0.30	0.95-1.05	0.90-1.00
کدو	0.20-0.40	0.90-1.00	0.70-0.80
چغندرقند	0.20-0.40	1.05-1.20	0.70-1.00
نیشکر	0.40-0.50	1.00-1.30	0.50-0.60
آفتابگردان	0.30-0.40	1.05-1.20	0.35-0.45
توتون	0.30-0.40	1.00-1.20	0.75-0.85
گوجه‌فرنگی	0.25-0.52	1.05-1.25	0.60-0.85
هندانه	0.25-0.50	1.00-1.10	0.20-0.70
گندم	0.20-0.40	1.05-1.25	0.20-0.30

باید توجه داشت که معادلات و فرمول‌هائی که برای تعیین تبخیر-تعرق مرجع (ET_o) گفته شد برای شرایطی صادق است که سطح زمین کاملاً از گیاه مورد نظر پوشش شده باشد که این شرایط در حوضه‌های آبریز برآورد نمی‌شود مگر آنکه حوضه‌ای جنگلی وبا یکنوع پوشش یکنواخت وجود داشته باشد. بنابراین برآورد تبخیر وتعرق به صورت فوق فقط برای محاسبات نیاز آبیاری در اراضی پایاب سدها صادق خواهد بود که این محاسبات بیشتر در قلمرو و تخصص مهندسان آبیاری و زراعت می‌باشد تا متخصصان هیدرولوژی. لذا برای کسب اطلاعات بیشتر در این زمینه به کتاب طراحی سیستم‌های آبیاری و رابطه آب و خاک و گیاه مراجعه شود.

مسائل

۶-۱ سطح یک مخزن در طی ماههای اردیبهشت تا مهرماه بطور متوسط ۱۰/۸۶ کیلومتر مربع و سرعت باد در ارتفاع دو متری ۹ نات می‌باشد. چنانچه متوسط فشار بخار اشباع (e_s) در طی این‌مدت ۱۵/۳ و متوسط فشار واقعی بخار (e_d) برابر ۱۱/۲ میلی‌بار باشد حجم آب تلف شده دراثر تبخیر در این دریاچه چقدر تخمین زده می‌شود.
جواب (۴/۸۶۹ میلیون متر مکعب)

۶-۲ در ۱۷ خرداد سال ۱۳۷۶ داده‌های حداکثر و حداقل دما در یک ایستگاه به ترتیب ۳۱/۴ و ۱۲/۷ درجه سلسیوس بوده است کمبود فشار بخار آب در این روز را با توجه به اینکه دمای ۱۲/۷ درجه دمای نقطه شبنم نیز بوده است محاسبه کنید.
(جواب ۱/۳۹ کیلو پاسکال)

۶-۳ میانگین دمای ماهانه، طول روزهای ماه و رطوبت نسبی در یک حوضهٔ آبریز در ماههای مختلف سال به شرح زیر تعیین شده است.

ماه	دمای هوا °C	متوسط طول روز(ساعت)	رطوبت نسبی ٪	ماه	دمای هوا °C	متوسط طول روز(ساعت)	رطوبت‌نسبی ٪
Jan	-۵	۹	۷۵	Jul	۲۵	۱۳	۳۰
Feb	-۲	۱۰	۷۰	Aug	۲۳	۱۲	۳۵
Mar	۳	۱۱	۶۵	Sep	۱۵	۱۰	۳۷
Apr	۷	۱۲	۵۵	Oct	۱۰	۱۰	۲۹
May	۹	۱۳	۴۵	Nov	۷	۹	۵۵
Jun	۱۸	۱۴	۴۰	Dec	۲	۹	۶۵

الف: مجموع تبخیر- تعرق پتانسیل را به روش ترنت‌وایت و تبخیر-تعرق گیاه مرجع رابه‌روش بلانی -کریدل FAO محاسبه کنید.

۶-۴ حداکثر دما در یک روز از ماه تیر ۳۲ و حداقل ۱۲ درجهٔ سانتی‌گراد است. میانگین

حداقل رطوبت نسبی ۶۵ درصد و سرعت باد ۲۵۰ کیلومتر در روز می‌باشد. عرض جغرافیایی محل ۳۵ درجهٔ شمالی است. مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل در روز در این محل را به روش پنمن فائو محاسبه کنید. سرعت باد در شب نصف سرعت آن در طول روز است و آسمان در این روز صاف بوده و مقدار تابش زیاد است. ارتفاع محل از سطح دریا ۹۰۰ متر است. حداکثر رطوبت نسبی به ۸۰ درصد رسیده و سرعت باد در ارتفاع ۲ متری اندازه‌گیری شده است. تعداد واقعی ساعات آفتاب نیز ۱۱ ساعت بوده است.

منابع برای مطالعه بیشتر

1- Blaney, H. and W. Criddle. *Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data,* USDA, SCS-TP-96, Washington,1950.

2- Bras, R.L., *Hydrology (An introduction)* Addison, Wesley pub. New York, USA,1990.

3- Doorenbos, J. and W. Pruitt, *Water Crop requirements, irrigation and Drainage paper* 24, FAO, UN. Rome, 1975.

4- Green, F., *Potential evaporation determined from lysimeters,* Rep. Inst. Geol. Sci. No. 7916, 1979.

5- Gupta, R.S., *Hydrology and hydraulic systems,* Prentice Hall Publ. New Jersey, USA, 1989.

6- Shaw, E., *Hydrology in practice,* Van Nostrand Reinhold, London, 1988.

7- Ward, A.D. and W.J. Elliot, *Environmental hydrology,* Lewis pub. New york, USA, 1995

8- Wilson, E., *Engineering hydrology,* Mac Millan Co. London, 1984.

9- WMO, *Measurment and estimation of evaporation and transpiration,*Tech. Note 83, No. 201-TP-105, 1968.